

1893-48

ENCYCLOPÉDIE CHIMIQUE

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION DE

M. FREMY

Membre de l'Institut, professeur à l'École polytechnique, directeur du Muséum
Membre du Conseil supérieur de l'instruction publique

PAR UNE RÉUNION

D'ANCIENS ÉLÈVES DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE, DE PROFESSEURS ET D'INDUSTRIELS

ET NOTAMMENT DE

MM. ARSON et AUQUOIN, ing. en chef des travaux chim. à la Compagnie parisienne du gaz
BECQUEREL, répétiteur à l'École polytechnique; BERTHELOT, sénateur, membre de l'Institut
BOUILHET, ing. dir. de la maison Christofle; M. BOURGEOIS, répétiteur à l'École polytechnique
BOURGOIN, professeur à l'École du pharmac.; BOUTAN, ingénieur des Mines
BRESSION, ancien directeur des mines et usines de la Société autrichienne des chemins de fer de l'État
CAMUS, directeur de la Compagnie de gaz; A. CARNOT, directeur des étoiles de l'École des mines;
CHASTAING, pharm. en chef de la Pitié; CLÈVE, professeur à l'Université d'Upsal; GUMENGE, ingén. en chef des mines
CURIE (J.), maître de conférences à la Faculté des sciences de Montpellier; DEBIZE, ingénieur en chef des manuf. de l'État
DEBRAY, membre de l'Institut; DECAUX, directeur des teintures des manuf. de l'État; DERÉRAIN, prof. au Muséum
DITTE, professeur à la Faculté des sciences de Caen; OUBREUIL, président de la chambre de commerce à Limoges
OUCLAUX, prof. à l'Instit. agronom.; DUPRÉ, s-dir. du labor. métallip.; OUQUESNAY, ing. des manuf. de l'État
EUVERTE, directeur des forges de Terre-Noire; DU FORCRANO, docteur des sciences; FUCHS, ing. en chef des Mines
GAUDIN, ancien élève de l'École polytechnique, prof. de chimie; GIRARD, directeur du laboratoire municipal
L. GRUNER, inspecteur général des mines; GUNTZ, maître de conférence à la Faculté des sciences de Nancy
HENRIVAUX, directeur de la manufacture des glaces de Saint-Gobain
JOANNIS, maître de conférences à la Faculté des sciences de Bordeaux; JOLY, maître de conférences à la Sorbonne
JOULE, pharmacien en chef de l'ho.-pice Dubois; JUNGFLEISCH, professeur à l'École de pharmacie
KOHL, administrateur de la Société des manufactures des produits chimiques du Nord
LEIDIÉ, pharm. en chef de l'Hôpital Necker; LEMOINE, ing. en ch. des ponts et chaussées, examiné, à l'École polytechnique
LOGIN, ing. des mines; MALLARD, prof. à l'École des mines; MARGOTET, prof. à la Faculté des sciences de Orléans
MARQUERITTE, président du conseil d'admis. de la compagnie paris. du gaz
MATHEY, dir. des houillères de Blanzy; MEUNIER (STANISLAS), aide-nature au Muséum; MOISSAN, agrégé à l'Éc. de pharm.
MOUTIER, examinateur de sortie à l'École polytechnique
MUNTZ, dir. des travaux pratiques de Chimieau cass., des arts et métiers; NIVOIT, professeur à l'École des ponts et chaussées
OCEANT, anc. élève de l'École polytechnique; OGIER, dir. du laboratoire de toxicologie à la préfecture de police
PARBET, chim. principal au laboratoire municipal; PARMENTIER, professeur à la Faculté des sciences de Montpellier
PECHINÉY, directeur des usines de produits chim. du soldat; PERSOZ fils, directeur de la condition des soies
POMMIER, industriel; PORTES, pharm. en chef de l'Hôpital de Louvain; PRUNIER, prof. à l'École de pharmacie
RIBAN, directeur du laboratoire de la Serbancie; ROSWAG, ingénieur civil des Mines
ROUSSEAU, s-dir. du laboratoire de chimie de la Sarbonne; SABATIER, prof. à la Faculté des sciences de Toulouse
SARRAU, professeur à l'École polytechnique; SCHLAGENHAUFFEN, prof. à l'École de pharmacie de Nancy
SCHEGESING, prof. au Conservatoire des arts et métiers; SOREL, soc. ingén. des manuf. de l'État
TERREL, aide-naturaliste au Muséum; TERQUEM, professeur à la Faculté de Lille
URBAIN, répétiteur à l'École centrale des arts et manufactures; VERNEUIL, professeur de chimie
VIELLE, ing. des poudres et salpîtres; VILLIERS, agrégé à l'École de pharm.; VINCENT, prof. à l'École centrale
VIOLLE, prof. à la Faculté des sciences de Lyon; WELOON, membre de la Société royale de Londres, etc.

TOME V

Applications de Chimie inorganique. — 2^e Section. — Industries chimiques

2^e Partie. — Métallurgie

ACIERS

Par M. BRESSION

Ancien directeur des mines et usines de la Société autrichienne des Chemins de fer de l'État

PARIS

V^e CH. DUNOD, ÉDITEUR

LIBRAIRIE DES CORPS NATIONAUX DES PONTS ET CHAUSSÉES, DES CHEMINS DE FER,
DES MINES ET DES TÉLÉGRAPHES

49, Quai des Augustins, 49

1886

Droits de traduction et de reproduction réservés

LES ACIERS

LEURS PROPRIÉTÉS, LEUR FABRICATION, LEURS EMPLOIS

Par M. G. BRESSON

Ancien Directeur des Mines et Usines de la Société Autrichienne-Hongroise
des Chemins de fer de l'État.



CHAPITRE PREMIER

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LA CONSTITUTION DES ACIERS

Difficultés que présente la définition des aciers. — Recherches de Berthier, Faraday et Stodart. — Travaux de M. Chevreul. — Théorie fondamentale de M. Fremy sur la constitution des aciers. — Cette théorie, en écartant définitivement l'hypothèse de la propension aciéreuse des minéraux, ouvre la voie à l'étude méthodique des propriétés de l'acier. — Influence de cette étude sur les progrès actuels de la métallurgie. — Théorie nouvelle de MM. Osmond et Werth. — Conclusion.

L'étude de tout corps simple ou composé doit être, autant que possible, précédée d'une définition résumant brièvement ses principaux caractères. Pour l'acier cette définition est particulièrement difficile à établir, car il est impossible de définir en termes courts et précis l'*état spécial du fer*, auquel le nom d'acier doit être appliqué; la fusibilité, la faculté d'être travaillé sous le marteau à une température convenable, la finesse du grain, la densité, l'élasticité, la dureté acquise par la trempe, ne suffisent pas pour caractériser les composés de nature et d'origine complexes qui portent le nom d'acières. Ces propriétés se rencontrent toutes dans un certain nombre de métaux ou d'alliages qui ne sauraient rendre les services qu'on demande aujourd'hui à l'acier dans la pratique des arts industriels.

Une autre cause d'erreurs, ou tout au moins de malentendus, est venue compliquer encore la question. Par des procédés ayant d'abord exclusivement en vue la fabrication de l'acier, on est arrivé à produire à l'état fondu des métaux qui par leurs propriétés physiques et chimiques, ainsi que par leur mode d'emploi, doivent être rangés incontestablement dans la catégorie des fers à grains fins, tels que le puddlage les produisait depuis longtemps et les produit encore aujourd'hui. Avant le secours des hautes températures obtenues dans la cornue Bessemer et le four

Siemens, on n'arrivait pas à fondre le fer par des procédés industriels, tandis que les aciers fondus au creuset avaient depuis longtemps fait leur apparition. On a, par suite, dans le langage usuel, conservé le nom d'acières, à des produits ferreux qui sont absolument à la limite entre l'acier et le fer, quand ils ne sont pas déjà le fer lui-même, sur les propriétés duquel on se met plus facilement d'accord. C'est donc en partant du fer théoriquement pur, et en examinant les modifications qu'introduisent dans son état les divers corps simples qui s'associent à lui, que nous arriverons, sinon à une définition synthétique des aciers, impossible comme nous l'avons dit, du moins à une analyse méthodique de leurs variétés et des propriétés qui caractérisent chacune d'elles.

Les théories les plus anciennes attribuent la différence entre l'acier et le fer à la présence dans le premier de quelques millièmes de carbone. A l'époque dont nous parlons, c'est-à-dire dans la première moitié de ce siècle, les procédés d'analyse chimique étaient encore à leur début, et il était naturel d'attribuer le rôle essentiel, unique même, dans l'aciération, à la substance qui, dans les aciers obtenus industriellement, s'y rencontrait en quantité assez notable pour éclipser en quelque sorte toutes les autres. Plus tard on reconnut l'influence que d'autres corps pouvaient exercer sur les propriétés de l'acier. Berthier parle du chrome, Faraday et Stodart de l'aluminium, du platine et des métaux qui l'accompagnent : bientôt un fait survint dont l'importance fut signalée par M. Chevreul, qui avait fait à l'étude de l'acier une place dans ses nombreux travaux. Ce fut la production par ces mêmes expérimentateurs d'un acier obtenu au moyen de fer fondu avec quelques centièmes d'iridium et d'osmium, et qui, tout en présentant les caractères physiques des aciers ordinaires, ne donnait à l'analyse aucune trace de carbone. M. Chevreul fut ainsi conduit à envisager l'acier en général, non comme un corps défini par la nature de ses parties constitutantes, mais *comme un état particulier du fer produit par l'union de ce métal avec des corps dont la nature peut varier*. C'est conformément à cette manière de voir, qu'après avoir défini l'acier, indépendamment de toute considération scientifique, *du fer qui se durcit par la trempe*, M. Chevreul distingua :

- 1^o Des aciers formés de fer et de carbone ;
- 2^o Des aciers formés de fer, de carbone et d'un troisième corps ;
- 3^o Des aciers formés de fer et d'un autre corps qui n'est pas le carbone, ou des aciers sans carbone.

Ces observations nouvelles, et la théorie qui en avait été la conséquence, avaient singulièrement élargi la question de l'acier. Il était réservé à M. Fremy de lui ouvrir des horizons nouveaux par l'étude d'un élément négligé jusqu'alors, et dont l'importance devait ainsi se révéler.

Avant d'aborder l'étude de ces travaux décisifs pour l'histoire de l'acier, il convient, en empiétant quelque peu sur la partie métallurgique de cet ouvrage, de rappeler qu'au moment où les recherches de M. Fremy furent commencées, l'acier était obtenu industriellement de deux manières. On le produisait, ou bien en partant de la fonte, c'est-à-dire en prenant comme point de départ une matière contenant un excès de carbone, et en éliminant cet excès de carbone pour arriver au degré voulu ; on avait alors l'acier dit naturel, de forge, etc. ; ou bien, on utilisait comme matière première, du fer amené par affinage à un état de pureté aussi complet que

possible, et l'on y réincorporait une quantité de carbone en rapport avec les diverses propriétés du métal qu'on voulait obtenir; on avait ainsi l'acier cémenté. Ces deux méthodes sont du reste encore en usage aujourd'hui; mais la première a changé de nom, et en devenant le procédé Bessemer, a envahi la métallurgie du fer tout entière; quant à la cémentation, on l'emploie encore, mais sur une échelle très réduite et pour obtenir des produits tout spéciaux.

Avec les idées ayant eu cours jusqu'alors, la cémentation ne pouvait être considérée que comme une opération simplement carburante, ayant pour but de donner au fer le carbone destiné à le transformer en acier. Tous les corps dont on avait successivement constaté l'existence dans les aciers du commerce, tels que le phosphore, le silicium, le soufre, le manganèse, étaient considérés comme étrangers à leur constitution. Une étude attentive des procédés industriels conduisit au contraire M. Fremy à reconnaître que l'acier n'est point un simple carbure de fer et que des corps autres que le carbone peuvent jouer dans l'aciération un rôle constitutif; l'aciération cessait ainsi d'être une opération purement carburante, et permettait alors, en faisant entrer dans la composition de l'acier des corps autres que le carbone, d'utiliser pour cette fabrication certaines fontes qui, contenant une proportion plus ou moins considérable de ces corps, devaient nécessairement en laisser des traces dans les aciers obtenus par elles. Aussi longtemps qu'on avait demandé au carbone seul de faire l'acier, ces corps étrangers supplémentaires et par suite nuisibles, écartaient l'emploi des fontes qui les recélaient. A partir du moment où le carbone était, qu'on nous pardonne cette image, condamné à leur céder la place ou bien à la partager avec eux, ces mêmes fontes pouvaient être employées avec succès. Or, la plupart des fontes françaises étant dans ce dernier cas, on voit quelles importantes conséquences pratiques résultaient de cette nouvelle manière d'envisager la constitution chimique des substances aciéreuses.

Les recherches de M. Fremy portèrent également sur un corps dont le rôle avait été jusqu'alors ignoré ou tout au moins méconnu. En soumettant un grand nombre d'acières à l'influence de l'hydrogène qui, en réagissant au rouge, produisait un dégagement abondant d'ammoniaque, M. Fremy reconnut la présence de l'azote dans tous les échantillons soumis à l'expérience; le même résultat était atteint en étudiant les résidus laissés par les aciers après dissolution dans le bichlorure de cuivre et l'eau iodée. Le corps brun ainsi obtenu était toujours azoté; il se dissolvait en partie dans la potasse, et complètement dans l'acide azotique, en présentant les caractères d'un corps cyanuré, et non ceux du carbone pur. Dans bien des cas on reconnut même que la qualité des aciers se trouvait en rapport avec la quantité d'azote qu'ils contenait; ce métalloïde devait donc prendre place à côté des autres corps simples dont l'action avait cessé d'être contestée.

A la suite de nombreuses expériences dont on trouvera les détails dans l'important *Traité de chimie générale* publié en 1865 par MM. Pelouze et Fremy, et dans les mémoires qu'il publia sur cette matière à la même époque, M. Fremy fut conduit à résumer ainsi sa théorie, qui, après vingt années d'études incessantes dans les laboratoires et les usines, reste encore aujourd'hui le guide le plus sûr pour les recherches du même ordre.

« *Le carbone n'est pas le seul agent de l'aciération, les corps qui se trouvent dans les aciers, tels que l'azote, le silicium, le phosphore, le soufre, le cyanogène,*

le manganèse, le titane, le tungstène, l'antimoine, etc., peuvent y jouer un rôle constitutif. Tous ces corps, sans avoir à beaucoup près une égale importance au point de vue de l'aciération industrielle, exercent souvent une influence utile sur les propriétés de l'acier; les uns facilitent son étirage, lui donnent du corps et de l'élasticité, d'autres développent sa force coercitive; quelques-uns augmentent sa fusibilité et son homogénéité; il en est qui le durcissent et le rendent facile à tremper. L'acier n'est donc pas seulement un carbure de fer, c'est un alliage de fer dont les propriétés peuvent varier à l'infini, suivant la nature des corps que l'on unit au métal. L'art du fabricant d'acier est de combiner au fer les différents éléments aciéreux, de les équilibrer, de manière à produire les diverses espèces d'aciers qui sont utiles à l'industrie.

« Prises dans leur ensemble, les modifications du métal peuvent être représentées par trois états particuliers.

« Lorsque des métalloïdes tels que l'oxygène, l'azote, le carbone, le soufre, le phosphore, le silicium, le bore, le cyanogène, etc., agissent au rouge sur le fer, ils lui font éprouver une première modification, qui est annoncée par un changement de texture: le fer, en absorbant quelques millièmes du métalloïde, devient grenu et lamelleux; il acquiert alors des propriétés nouvelles; cette première transformation peut recevoir le nom d'état aciéreux. Le fer brûlé est l'état spécial produit par l'oxygène, le fer azoté est la modification due à l'azote. Le soufre, le phosphore, le carbone, le cyanogène, le silicium agissent de même. De là l'existence d'une famille nombreuse d'aciers, qui diffèrent entre eux par la nature du corps qui a produit la modification aciéreuse du fer.

« La seconde modification qui représente l'état fonteux est produite par les mêmes corps simples qui ont d'abord aciéré le fer, mais qui agissent alors en plus forte proportion; ces nouveaux composés sont fusibles et constituent la famille des fontes qui correspondent à celle des aciers.

« La troisième modification du fer est caractérisée par la formation de composés définis qui souvent sont cristallins; elle se produit lorsque le métalloïde est en grand excès par rapport au métal et qu'il se trouve sous un état favorable à la combinaison.

« Presque tous les corps simples peuvent donc, en agissant sur le fer, donner d'abord des aciers, ensuite des fontes et, en dernier lieu, des composés définis. Il peut donc exister des aciers formés par l'action d'un seul corps sur le fer, tel que le carbone, comme il existe des aciers complexes dans lesquels une collection de plusieurs corps simples donne au fer les propriétés aciéreuses qu'exige l'industrie.

Cette théorie, nous le répétons, contient en germe tous les progrès de la métallurgie contemporaine. Quelques expressions, nouvelles alors, ont acquis dans la pratique journalière une singulière importance. Le fer brûlé! Quel est l'ingénieur qui, chargé de la conduite d'un atelier Bessemer, n'a pas prononcé ce mot avec inquiétude lorsque, après un soufflage trop prolongé, l'aspect de la scorie venait lui révéler qu'un excès d'oxygène dans le bain métallique rendait le contenu de la cornue à peu près inutilisable. A tout moment, ce sont au contraire les actions bien-faisantes d'un des corps énumérés ci-dessus qui viennent à être mises en lumière. C'est le silicium qui, incorporé dans les aciers fondus, prévient les souffrances, et résout ainsi un intéressant problème industriel; c'est le chrome qui, augmentant

notablement la résistance à la flexion, vient donner une importance spéciale et toute récente à l'acier chromé pour la construction des ponts métalliques. Tous ces progrès résultent d'une étude méthodique, presque toujours commencée dans le creuset du laboratoire, des alliages que le fer peut former avec la plupart des corps simples que la nomenclature chimique nous fait connaître. C'est cette étude sans parti pris que M. Fremy recommandait.

Les principes établis par M. Fremy dans son mémoire de 1865 devaient nécessairement ramener sur le terrain de l'observation positive une hypothèse qui, mise en avant par Leplay, avait longtemps prévalu dans l'enseignement de l'École des mines. Dans son *Traité de docimasie* publié en 1864, Rivot signalait comme paraissant être l'opinion la plus rationnelle, celle qui attribuait les propriétés aciéreuses à une disposition moléculaire spéciale préexistante dans certains minérais. Cette observation pouvait même être, suivant lui, présentée d'une manière plus générale, en ce sens que chaque minéral devait avoir une disposition à produire des fers doués de caractères spéciaux. C'est ainsi que quelques minérais, notamment les fers oxydulés, les hématites brunes, les fers carbonatés manganésifères, étaient signalés comme devant produire par une élaboration convenable de véritables aciers conservant très bien leurs propriétés utiles, tandis que d'autres minérais, par exemple les mines en grains du Cher, ne pouvaient produire d'acières stables. « La pureté des minéraux et même la présence du manganèse ne sont certainement pas, disait Rivot, sans influence sur la production des aciers, mais elles ne suffisent pas pour expliquer les différences de propriété constatées dans la métallurgie. »

Aujourd'hui que les procédés de déphosphoration dans le convertisseur basique permettent d'obtenir avec les minéraux de la Moselle et du Luxembourg des produits métallurgiques présentant toutes les qualités des meilleurs aciers, cette théorie de la prédisposition moléculaire aciéreuse de certains minéraux paraît quelque peu étrange. On y retrouve comme un dernier reste de ces notions mystérieuses qui, au début de toute science, cherchent à expliquer des phénomènes constatés, mais encore entourés d'obscurités qu'une expérience décisive ne tardera pas à faire disparaître. C'est le phlogistique avant Lavoisier. C'est la force vive détruite par le choc des corps, avant les révélations de l'équivalent mécanique de la chaleur. C'est la dernière lutte de la conception métaphysique contre les vérités de la méthode expérimentale. Et si nous rappelons ici ces faits, qu'on ne nous accuse pas de manquer à la mémoire du professeur dont nous avons été l'élève. Les ouvrages de Rivot, si remarquables par la méthode d'exposition et la clarté du style, resteront des œuvres considérables en dépit de quelques aperçus erronés. Lui-même, sans doute, les eût bientôt rectifiés, si une mort prématurée ne fût venue l'enlever aux études qu'il poursuivait avec tant de zèle.

L'École des mines possédait à la même époque un professeur dont les travaux doivent également être signalés à cette place. Moins adonné aux recherches de laboratoire que les savants éminents dont nous avons jusqu'à présent invoqué le témoignage, Gruner excellait à résumer à un moment donné, sous une forme pratique, les progrès de la Métallurgie dont la chaire lui était confiée. C'est à ce titre que nous rappelons ici un mémoire publié en 1867 à l'occasion de l'Exposition, sous le titre de *L'acier et sa fabrication*. Dans ce travail, Gruner, signalant la théorie émise par Rivot dans sa *Docimasie* sur les *mines d'acier*, et se refusant à discuter

ce qu'il qualifie d'ingénieuse hypothèse, ne peut cependant omettre la remarque que ces mêmes mines d'acier donnent tout aussi bien d'excellents fers doux, et qu'il suffit pour les obtenir de prolonger l'affinage. « Puis ces fers doux redonnent de l'acier de première qualité, lorsqu'on les chauffe avec du charbon. Il semble donc plus naturel, ajoute-t-il, de supposer que les modifications si variées que subit le fer doux sont dues à l'intervention du carbone et de diverses autres substances étrangères. Il faut en excepter bien entendu les simples changements de densité, de texture et de ténacité que tous les métaux éprouvent, lorsqu'on favorise ou détruit leur état cristallin par la chaleur et les actions mécaniques. »

Ce sont là, sous une forme plus réservée, et telle que le commandait la situation respective des deux professeurs, les idées de M. Fremy lui-même. Gruner du reste ne tarde pas à invoquer son témoignage. « M. Fremy, dit-il, mentionne dans l'acier la présence du carbone, du silicium, du phosphore, de l'arsenic, du soufre, du potassium, du sodium, du calcium, du magnésium, de l'aluminium, du manganèse, du nickel, du chrome, du titane, du vanadium, du cuivre, de l'azote, etc., etc. ; les analyses que je vais citer donnent encore quelques autres éléments tels que le cobalt, le molybdène, etc. On peut dire d'une manière générale que les fontes comme tous les métaux bruts renferment une fraction de presque tous les éléments dont se compose le lit de fusion qui les a produits. »

Se plaçant alors plus spécialement sur le terrain du métallurgiste, Gruner ajoutait :

« L'expérience prouve que l'on peut obtenir de la fonte et du fer malléable avec n'importe quel minerai de fer, mais les fontes et les fers produits ont des propriétés variables, parce que les minéraux sont plus ou moins purs, et que les méthodes de traitement ne réalisent pas toutes au même degré l'élimination des substances étrangères. On aura, suivant les circonstances, un métal plus ou moins tenace ou cassant, dur ou mou, pur ou impur, mais on n'en donnera pas moins à chacun de ces produits extrêmes les noms de *fonte* ou de *fer*. Pour le même motif on devra nommer *acier* tout produit intermédiaire qui ne sera ni fer doux ni fonte, quel que soit d'ailleurs son degré de pureté.

« On peut appeler *fonte* le produit fondu brut de la réduction des minéraux de fer. C'est un fer impur qui n'est pas malléable au moins à chaud, mais qui peut se tremper par un refroidissement brusque.

« On donne le nom de *fer doux* au métal plus ou moins épuré extrait de la fonte ou directement des minéraux de fer, malléable à chaud et à froid, mais non susceptible de prendre la trempe.

« Et le praticien appellera *acier* tout produit intermédiaire pouvant subir la trempe, mais restant malléable à chaud et à froid s'il n'est pas trempé ; et ce métal sera de l'acier, quelle que soit d'ailleurs la méthode suivie pour l'obtenir, extraction directe du minerai, affinage partiel de la fonte, ou recarburation du fer doux. D'après cela, par ses propriétés comme par sa fabrication, l'acier est compris entre la fonte et le fer doux. On ne peut même pas dire où commence et où finit l'acier. C'est une série continue qui part de la fonte noire la plus impure, et aboutit au fer doux le plus mou et le plus pur. La fonte passe à l'acier dur en devenant malléable et l'acier proprement dit passe au fer, en donnant successivement de l'acier doux, de l'acier ferreux, du fer aciéreux, du fer à grain. Et ces passages s'observent non seulement lorsqu'on compare les propriétés et le mode de fabri-

cation des produits, mais encore leur composition chimique. Sans doute il est fort difficile, impossible même, de déterminer la composition rigoureuse des fontes, aciers et fers. Les éléments sont si variés et souvent en proportion si faible, qu'en présence de l'énorme prépondérance du fer, leur dosage exact devient impossible. Mais ce qui ressort en tout cas des analyses faites, c'est que les mêmes éléments étrangers se retrouvent dans les fontes, les fers et les aciers, et qu'après tout, ce qui différencie les trois produits, c'est uniquement, comme Karsten l'a établi depuis longtemps, les proportions relatives des corps, dont une partie est simplement mêlée au fer, l'autre intimement combinée ou plutôt à l'état de dissolution. »

Voilà certes des idées pratiques et clairement exprimées. Nous y trouvons cependant deux points sur lesquels M. Fremy, consulté aujourd'hui sur l'œuvre de l'ingénieur, qui avait su si heureusement interpréter ses travaux, ferait peut-être certaines réserves. On ne peut plus dire, à l'heure actuelle, qu'il est difficile, impossible même de déterminer la composition rigoureuse des fontes, aciers et fers. Les procédés analytiques ont fait de tels progrès depuis l'époque où ces lignes ont été écrites, qu'il n'est plus impossible de déterminer d'une manière qui peut être considérée comme vraiment exacte, la composition des fers et des aciers; d'autre part, peut-on affirmer que dans l'acier une partie du carbone, ou des autres métalloïdes qui s'y rencontrent, se trouve mêlée au fer tandis que l'autre y est intimement combinée ou plutôt à l'état de dissolution?

Un mémoire tout récent de MM. Osmond et Werth, publié dans la 4^e livraison des *Annales des mines* de 1885 sous le titre de « *Théorie cellulaire des propriétés de l'acier* », va nous permettre de faire un pas important dans l'étude de cette question, qui jusqu'à présent n'avait jamais été traitée d'une manière aussi complète. Nous ne saurions donc mieux terminer ce chapitre qu'en présentant un résumé des expériences de MM. Osmond et Werth faites pour la plus grande partie au laboratoire du Creusot, avec toutes les ressources que présente cet établissement, ainsi que de la théorie qui en a été la conséquence.

MM. Osmond et Werth rappellent en commençant que si l'on attaque un barreau d'acier naturel par l'acide chlorhydrique étendu, au pôle positif d'un élément Bunsen, le résidu charbonneux garde la forme, l'aspect et les dimensions du barreau primitif. Ce résidu délayé dans l'alcool (pour éviter l'oxydation) se montre principalement composé de paillettes microscopiques grises, magnétiques et brillantes. L'analyse chimique y trouve comme éléments essentiels du fer, du carbone et une certaine quantité d'eau qui varie suivant les circonstances de l'expérience sans être jamais nulle. C'est un carbure de fer qui paraît avoir subi un commencement* d'attaque pendant son séjour prolongé dans l'acide, et la structure en paillettes de ce carbure montre qu'il est interposé dans l'acier, comme le graphite dans les fontes grises, et non pas mélangé ou dissous uniformément dans la masse ferrueuse. De plus le barreau conservant sa forme après la dissolution du fer libre, il faut que le carbure constitue un réseau continu dans les mailles duquel le fer était logé.

Partant de cette expérience fondamentale, MM. Osmond et Werth admettent que l'acier naturel est formé de *granulations de fer doux généralement revêtues d'un enduit de carbure de fer*, dont l'épaisseur varie avec la dureté de l'acier et les conditions physiques qui président aux arrangements moléculaires, et, par une

assimilation ingénieuse, ils comparent la granulation ferreuse au *noyau*, le carbure à l'*enveloppe* des cellules organiques, et désignent l'ensemble ainsi formé sous le nom de *cellule simple*. Ce carbure, avec tous les autres corps simples qui, comme nous l'avons vu, l'accompagnent dans la pratique, semble donc former comme une sorte de *ciment* servant à réunir les noyaux entre eux.

Comment la cellule simple se forme-t-elle, et quel est son rôle dans la constitution de l'acier? Pour l'expliquer, MM. Osmond et Werth partent de ce fait que le carbone existe à l'état libre dans les fontes; il s'y présente sous forme de graphite résultant évidemment de la décomposition du carbure de fer à une certaine température. Si cette formation de graphite n'est pas ordinairement réalisée dans les fontes blanches et les aciers, cela prouve seulement qu'elle exige des conditions particulières, mais il suffit qu'on l'obtienne dans certains cas pour qu'on soit en droit de considérer comme très probable la dissociation du carbure de fer aux températures élevées.

Une barre d'acier portée au rouge doit donc contenir 1° : du fer en excès 2° un ou plusieurs carbures de fer; 3° du carbone libre. A mesure qu'on la chauffera davantage, la proportion du carbure de fer non dissocié diminuera, et celle du carbone libre augmentera. Si nous examinons au contraire une masse d'acier fondu récemment coulé dans une lingotière, le refroidissement devra déterminer une recombinaison graduelle du fer et du carbone dissociés, et bientôt la solidification du fer en excès beaucoup moins fusible que ses carbures. C'est cette différence de fusibilité du fer et des carbures de fer qui provoque ces granulations du fer pur que MM. Osmond et Werth ont reconnu former l'unité anatomique primordiale du tissu cellulaire. Elles sont comparables à ces petites sphères, désignées souvent sous le nom de *globulites* et qui doivent être considérées comme la première manifestation des forces cristallines qui tendent à individualiser une substance quelconque. « Ce sont donc des globulites de fer qui vont se précipiter au sein d'un liquide mère formé essentiellement de carbure de fer et contenant en outre diverses combinaisons du fer avec les métalloïdes. Les globulites s'accrochent en partie aux parois déjà solidifiées, en partie se rassemblent au fond du vase clos que forment ces parois; là, soit par leur propre poids, soit par la pression due au retrait des couches extérieures, ils se serrent les uns contre les autres et, comme ils sont extrêmement plastiques au voisinage du point de fusion, se déforment mutuellement et se limitent par des faces de polyèdre. Ces polyèdres constituent ce qu'on appelle communément le grain de l'acier.

« Le refroidissement continuant, on conçoit que des matériaux de seconde consolidation puissent s'isoler (phosphure de fer, siliciure de manganèse, etc.), suivant les affinités et les points de fusion respectifs. Finalement il reste à l'état fluide un mélange plus ou moins complexe où domine ordinairement le fer carburé qui se solidifie à son tour dans les joints des globulites polyédrisés, et les unit en un seul bloc: c'est le ciment.

« Les globulites qui constituent le noyau de la cellule simple ne sont pas des unités indépendantes. Les minéralogistes qui les ont étudiés les premiers reconnaissent qu'ils se composent dans les minéraux en associations plus élevées. Il en est de même pour les aciers, et l'agrégation des globulites en édifices plus complexes est prouvée par les figures de formes plus compliquées que montrent les

attaques de sections polies surtout au centre des lingots où le retrait du ciment les a laissées visibles et pour ainsi dire à sec^{1.} »

Telle est dans ses traits principaux la nouvelle théorie de MM. Osmond et Werth. Formulée dans un premier mémoire qui, contenant déjà toutes les conclusions essentielles, avait été déposé sous pli cacheté à l'Académie des sciences le 9 juillet 1883, elle a été soumise le 17 novembre 1884 à l'examen d'une commission composée de MM. Fremy, Tresca et Boussingault, et son insertion dans les *Annales des mines* a eu lieu juste à point pour nous permettre de la mentionner. Elle repose essentiellement sur trois faits : dissociation du carbure de fer ; formation de cellules simples composées d'un noyau de fer pur et d'une enveloppe de carbure de fer ; formation d'édifices ou de congolomérats de cellules simples, dont les surfaces de contact ne présentent pas traces de carbure de fer, et sont par suite sans enveloppe. Elle ne renverse pas les théories de date plus ancienne qui considéraient le carbone comme combiné ou dissous dans le fer, mais, s'aidant d'une part du microscope, qui devient pour l'ingénieur comme pour le physiologiste un instrument constant du progrès, de l'autre des principes féconds de la thermo-chimie, elle s'efforce de montrer la vraie place de ce métalloïde et les transformations qu'il peut subir. Nous verrons toutefois qu'elle ne suffit pas encore pour permettre de juger sans appel les questions si controversées de la trempe et du recuit ; mais avant d'en venir là nous devons, en suivant des sentiers frayés depuis plus longtemps, revenir à l'étude minutieuse de la composition chimique des aciers, et de l'influence que cette composition exerce sur leurs propriétés physiques et mécaniques. Le chapitre qui suit sera consacré à l'examen de ces propriétés en général et des efforts qui peuvent les modifier.

1. Ces lignes sont empruntées textuellement au mémoire de MM. Osmond et Werth.

CHAPITRE II

INFLUENCE DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES ACIERS SUR LEURS PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES

Notions préliminaires. — Efforts de traction, de compression, de cisaillement, de flexion, de torsion.
— Efforts continus et répétés. — Chocs. — Expériences de MM. Barha, Wahler et Spangenberg. — Expériences récentes et mémoire de M. Considère sur les mêmes questions.

La connaissance des rapports qui existent entre la composition chimique des aciers et leurs propriétés physiques et mécaniques devient de plus en plus nécessaire pour en assurer l'utilisation rationnelle dans l'industrie. L'étude méthodique de ces rapports est de date très récente, et l'on peut dire qu'elle a été inaugurée à l'Exposition universelle de 1878, grâce à des documents d'une grande importance présentés par plusieurs compagnies métallurgiques, parmi lesquelles il convient de citer celles du Creusot et de Terre-Noire pour la France¹, la Société autrichienne I. R. P. des chemins de fer de l'État pour ses usines de Reschitz en Hongrie, enfin le Jernkontoret ou comptoir des forges de Suède, dont les indications étaient complétées par l'intéressant rapport de M. le professeur Akerman sur l'état de l'industrie du fer dans ce pays.

Les grands établissements d'Essen, de Bochum et de Hörde cussent sans doute apporté également à cette étude leur contribution, car ils avaient déjà présenté quelques renseignements de cette nature à l'Exposition universelle de 1873 ; mais l'abstention de l'Allemagne vis-à-vis de notre entreprise nationale nous oblige à les passer sous silence. Constatons par contre avec satisfaction que les établissements métallurgiques de la Société autrichienne, dont l'exposition avait été justement remarquée, étaient alors et sont encore dirigés par des ingénieurs français. Quant aux usines de Terre-Noire, tous ceux qui s'occupent de métallurgie savent la part importante qu'elles ont prise sous la direction de M. Euverte aux progrès de l'industrie de l'acier dans les dernières années. Nous aurons donc souvent à citer les travaux de M. Euverte et de ses principaux collaborateurs, MM. Valton, Gautier, Pourcel, Deshayes, qui tous ont apporté leur contribution à l'avancement de ces intéressantes questions.

En outre, divers travaux, parmi lesquels il convient de citer la communication

1. M. Victor Deshayes, ingénieur des aciéries de Terre-Noire, s'est particulièrement consacré à cette étude et a publié dans les *Annales des mines*, 5^e série, tome XV, une note sur les relations existant entre la composition chimique et les propriétés mécaniques des aciers.

faite par M. Barba à la Société des ingénieurs civils en juin 1880, le mémoire présenté à la même Société, en 1884, par M. Périsse, et tout récemment l'important mémoire sur l'emploi du fer et de l'acier dans les constructions, publié par M. Considère dans le numéro d'avril 1885 des *Annales des ponts et chaussées*, sont venus fournir de nouveaux renseignements que nous sommes heureux de pouvoir utiliser. Le mémoire de M. Considère étant le plus récent, et par suite le plus complet, c'est à lui que nous serons conduit à faire les plus fréquents emprunts.

En même temps que les méthodes de recherche s'engageaient dans une voie de plus en plus systématique, les appareils d'expérimentation se perfectionnaient et se développaient de manière à permettre d'opérer non plus sur des échantillons ou des éprouvettes de dimensions réduites, mais, en cas de besoin, sur les pièces façonnées elles-mêmes. Parmi ces appareils, celui employé à l'École polytechnique de Munich par M. le professeur Bauschinger mérite d'être cité en première ligne. On en trouvait une description détaillée dans la *Notice* publiée pour l'Exposition de 1878 par la Société autrichienne et dont nous avons déjà parlé. En France, c'est la machine due à l'ingénieur constructeur Thomasset qui s'est le plus répandue, et les grandes compagnies de chemins de fer, celle de l'Est en particulier, en font usage dans des ateliers d'essai de métaux qui peuvent être cités comme des modèles de bonne organisation. Nous y reviendrons en détail dans le chapitre consacré à la réception des aciers bruts et façonnés. En ce moment nous en sommes encore à la partie théorique de la question, et nous devons, avant de l'aborder, indiquer, ou rappeler au moins, le sens exact de certaines expressions d'un emploi relativement récent. Sans insister sur les termes de fusibilité, dureté, ténacité, malléabilité, ductilité, dont la plupart des traités de physique et de chimie font connaître la portée, c'est aux principes généraux de l'étude de la résistance des matériaux que nous devons surtout recourir ici.

Efforts auxquels sont soumis les métaux. — Les métaux employés dans la construction des machines (tiges de piston, bielles, manivelles, etc.) ou des bâtiments (poutres de formes diverses, entretoises, rivets, boulons, etc., etc.) peuvent travailler par traction, compression, cisaillement, flexion ou torsion. Les efforts qui en résultent peuvent se produire à des intervalles plus ou moins rapprochés, ou même être continus, et l'on conçoit à priori qu'un effort minime pourra, après avoir été exercé un très grand nombre de fois, ou s'être continué pendant un temps plus ou moins long, produire des effets auxquels un effort unique n'aurait pu atteindre. C'est l'histoire bien connue de la goutte d'eau qui laisse à la longue son empreinte sur la roche la plus dure. On a donc été conduit, pour se rapprocher autant que possible des conditions du travail pratique, à étudier l'effet des efforts prolongés ou répétés, et c'est sous ce rapport que le *Mémoire* de M. Considère est venu apporter à cette question de l'emploi des aciers un élément nouveau et du plus grand intérêt. Des expériences, instituées pour un but spécial, avaient, il est vrai, été faites déjà antérieurement. C'est ainsi que Vicat rendait compte en 1834, dans les *Annales des ponts et chaussées*, des essais qu'il avait poursuivis pendant trois ans, en vue de déterminer la charge maximum qu'il convient d'imposer aux câbles en fil de fer des ponts suspendus. M. Considère cite également des expériences de M. R.-H. Thurston, professeur au Stevens Institute of Technology, à Hoboken

(New-Jersey), dont on trouvera les détails dans son mémoire. Il rappelle aussi fréquemment les travaux de même ordre de MM. Wohler et Spangenberg, qui ont donné lieu à deux Mémoires insérés en 1866 et 1870, dans les *Annales de la Construction de Berlin* (*Zeitschrift für Bauwesen*). Mais avant M. Considère personne n'avait, à notre connaissance, résumé les résultats de ces expériences dans un corps de doctrines dont nous serons conduits plus d'une fois à signaler l'importance.

Traction. — Revenons au mode de travail le plus élémentaire des aciers, c'est-à-dire au travail par simple traction, et, pour en étudier les conditions, supposons une barre maintenue d'une manière invariable à son extrémité supérieure et soumise à sa partie inférieure à un effort parallèle à son axe. Cette barre peut supporter une certaine charge sans se déformer d'une façon permanente ou, pour mieux dire, d'une façon permanente appréciable (car il est démontré aujourd'hui que les allongements permanents commencent à se faire sentir dès les plus faibles charges), mais il arrive un moment où ces allongements permanents, d'abord très petits et à peine mesurables, deviennent brusquement considérables. Au même moment ces allongements, qui étaient pendant la première période de l'opération proportionnels aux charges, croissent plus vite que les charges pour redevenir ensuite plus voisins de la proportionnalité, jusqu'au moment où la barre continue à s'allonger, sans qu'il soit besoin d'augmenter la charge, pour arriver enfin à la rupture. Cette dernière période est celle pendant laquelle a lieu la contraction de la section au point où va s'opérer la rupture, et celle-ci se produit sous une charge moindre que la résistance maxima à la rupture. Ceci posé, on nomme *limite d'élasticité* la tension qui produit l'ensemble des phénomènes marquant la fin de la première période, et à cette tension correspond une déformation qu'on nomme *allongement élastique maximum*. Le quotient de l'une par l'autre donne ce qu'on nomme le *coefficient ou le module d'élasticité*.

Dans la pratique on exprime la limite d'élasticité par la tension qui la produit, ramenée au millimètre carré. Comme nous l'avons vu, l'élasticité n'est pas parfaite jusqu'à cette limite, puisque des charges bien inférieures produisent des allongements permanents, néanmoins on a conservé la notion de la limite d'élasticité, en la définissant comme la tension, à partir de laquelle les déformations permanentes ont une valeur mesurable sans instruments de précision. C'est à tort, comme le fait remarquer avec raison M. Considère, que certains expérimentateurs ont admis comme limite d'élasticité la plus faible tension pour laquelle ils constataient des allongements permanents avec des instruments de précision, car dans ces conditions sa valeur varie avec les observateurs et les instruments employés. Pour rendre absolument comparables dans tous les cas les résultats obtenus, il conviendrait de préciser davantage la définition, et de fixer par exemple, comme limite d'élasticité pratique, la tension pour laquelle l'allongement total est le double de l'allongement élastique calculé.

Nous avons vu que le moment qui précède la rupture de la barre est précédé d'une contraction, d'un étranglement qui se dessine en un de ses points et s'accentue jusqu'à ce que la rupture se produise dans la section la plus réduite. On donne à cette déformation le nom de *striction*, et sa mesure tend à jouer, dans l'examen des propriétés mécaniques des aciers, un rôle de plus en plus considérable. Certains

expérimentateurs prennent comme mesure de la striction, le rapport de la section contractée à la section primitive ; d'autres mesurent la contraction elle-même.

On appelle charge de rupture ou *résistance à la rupture*, l'effort qui a brisé le barreau, rapporté au millimètre carré de sa section primitive, et *allongement de rupture*, l'allongement total permanent qu'a pris la barre au moment de se rompre, rapporté à sa longueur.

La résistance à la rupture ainsi définie répond aux besoins de la pratique, car lorsqu'on a à calculer les dimensions d'une barre de métal, c'est de la section primitive qu'on dispose et c'est l'effort qu'elle peut supporter qu'il importe de connaître.

Toutefois, si on analyse le phénomène de la déformation, on reconnaît que cette définition de la résistance à la rupture est une abstraction et que la section du barreau, étant considérablement réduite au moment de la rupture, supporte en réalité une tension par millimètre carré beaucoup plus grande. D'autre part, l'allongement total que prend le barreau se compose de deux parties. A l'allongement régulier qu'a pris le barreau dans les parties restées cylindriques s'ajoute l'étirage de la partie contractée, et l'importance relative de cet étirage est d'autant plus faible que la longueur totale de la barre est plus grande. Il est clair que si cette longueur totale était très grande, l'allongement pour 100 total ne serait pas sensiblement influencé par la striction, et serait égal à l'allongement régulier des parties cylindriques ; si au contraire les repères sur lesquels l'allongement est mesuré ne comprenaient entre eux que la partie déformée par la striction, l'allongement pour 100 ne dépendrait que de la striction elle-même. C'est ainsi que M. Considère a été amené à décomposer l'allongement total, en *allongement proportionnel*, c'est-à-dire celui que la barre soumise à l'essai prend dans toute sa longueur jusqu'au moment où la striction commence, et en *allongement de striction* se rapportant spécialement à la partie contractée. Nous verrons plus loin que l'allongement de striction est toujours beaucoup plus grand relativement que l'allongement total, et que sa mesure présente une grande importance surtout pour l'étude des pièces percées de trous, présentant des défauts locaux, ou même simplement des variations de section, ce qui est le cas à peu près général dans les constructions de toute espèce.

Compression. — Les essais par *compression* donnent difficilement des résultats certains au point de vue de la limite et du coefficient d'élasticité, parce que la crainte des flexions latérales force à les faire sur des barres de faible longueur. Heureusement il est rarement nécessaire d'être fixé sur ce point en ce qui concerne l'acier, car il est constant que les pièces d'une certaine longueur ne se brisent pas par écrasement simple, mais par suite de flexions latérales dans lesquelles l'effort de traction intervient et est la cause habituelle des ruptures.

Cisaillement. — Le *cisaillement* est l'action qui se produit entre des sections très rapprochées auxquelles les forces extérieures tendent à donner un mouvement relatif parallèle à leur plan commun. Ce genre de travail se produit surtout dans les rivets et les boulons, qui jouent un rôle si important dans la stabilité des grandes constructions modernes, et pour la fabrication desquels les aciers doux sont de plus

en plus employés. On doit considérer également comme un cisaillement la tendance au glissement longitudinal des fibres les unes sur les autres, qui accompagne l'effort tranchant dans les pièces soumises à la flexion; mais au lieu d'être perpendiculaire aux fibres, cet effort leur est parallèle. On conçoit qu'il existe un coefficient d'élasticité de cisaillement, mais on a rarement à en faire usage dans les calculs de résistance.

Flexion. — L'effort de flexion est celui auquel, si l'on tient compte du tonnage fabriqué, les produits en acier sont surtout exposés; c'est en effet celui qui se produit particulièrement sur les rails de chemin de fer, bien que l'examen de l'effet des chocs répétés doive aussi entrer en ligne de compte dans la détermination de leur poids et de leur profil.

La flexion n'est pas une déformation simple comme celle que nous avons étudiée en premier lieu; c'est le résultat de tractions, de compressions et de cisaillements combinés. Les fibres extrêmes par lesquelles commence presque toujours la rupture ne sont soumises qu'à des tractions simples d'un des côtés de l'axe neutre, et à des compressions simples de l'autre côté, les efforts de cisaillement ne se développant que dans les fibres intérieures. De ce fait on a généralement conclu que la rupture par flexion n'est en somme qu'une rupture par traction et par compression, qu'elle ne mérite pas d'étude spéciale, qu'il suffit à tous égards d'établir une formule donnant en fonction du moment de flexion les tensions et les pressions qui se développent dans une barre fléchie, et d'adopter pour leur valeur les mêmes limites que pour celles des tensions et des pressions simples. La formule que l'on applique dans ce but est

$$T = \frac{Mn}{I}$$

dans laquelle T représente la tension ou la pression des fibres extrêmes, n la distance de ces fibres à l'axe neutre, I le moment d'inertie et M le moment de flexion auquel la pièce est soumise.

Cette formule suppose que les allongements et les raccourcissements des fibres sont proportionnels aux efforts; or, comme nous l'avons vu, cette proportion n'existe qu'en deçà de la limite d'élasticité. Cette constatation a conduit M. Considère à entreprendre une nouvelle étude de la flexion dont les résultats sont consignés dans le mémoire déjà cité. Il résulte de cette étude que la résistance à la flexion des diverses qualités d'acier ne varie pas dans la même proportion que leur résistance à la traction telle qu'on la définit jusqu'à présent, mais qu'elle se règle au contraire sur la résistance de striction; en conséquence, il ne semble pas raisonnable d'imposer aux métaux ductiles les mêmes limites d'efforts dans la flexion que dans la traction simple. Nous aurons à utiliser cette observation lorsque nous étudierons le rôle du carbone et du manganèse dans les aciers, et nous en tirerons les conséquences pratiques dans le chapitre consacré aux conditions de réception et d'épreuve des produits fabriqués.

Torsion. — Dans les constructions actuelles, l'acier est rarement exposé à des efforts de torsion, et les expériences qui s'y rapportent sont en général moins nombreuses. La torsion se décompose en cisaillements élémentaires, et il semble par

suite que la résistance à la torsion doit être en rapport avec la résistance au cisaillement. En réalité elle est plus forte, mais on peut admettre que les aciers se classent par rapport à elle dans le même ordre que dans les essais ayant en vue de déterminer la flexion.

Efforts continus. — Les premières expériences suggérées par cet ordre d'idées furent faites, avons-nous dit, par Vicat en 1854, en vue de déterminer la charge qu'il convient d'imposer aux câbles des ponts suspendus. Il prit quatre brins de fil de fer n° 4, non recuit, ayant une résistance à la rupture de 45^k,25 par fil, ce qui correspond à une résistance de 69 kilogrammes environ par millimètre carré. Il les chargea respectivement de

	10 ^k ,70	14 ^k ,25	21 ^k ,50	52 ^k ,25
représentant	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}$

du poids de 45 kilogrammes qui avait produit la rupture instantanée. Il constata ainsi que le fil tendu au $\frac{1}{4}$ avait pris au début un très léger allongement et était demeuré ensuite absolument invariable ; le fil tendu au $\frac{1}{3}$ s'était allongé de 2^{mm},75 en 55 mois ; le fil tendu à $\frac{1}{2}$ s'était allongé de 4^{mm},09 en 55 mois ; le fil tendu aux $\frac{3}{4}$ s'était allongé de 6^{mm},13 en 55 mois ; pour les trois derniers brins la vitesse d'allongement avait été constante pendant les trois années d'observation et, d'un brin à l'autre, elle avait été proportionnelle à la charge, car on a, à très peu près :

$$\frac{2,75}{\frac{1}{3}} = \frac{4,09}{\frac{1}{2}} = \frac{6,13}{\frac{3}{4}}$$

Il semblerait donc résulte de ces expériences que la limite usuelle d'élasticité déterminée par des essais rapides n'est nullement absolue, et que des allongements négligeables au début acquièrent à la longue une importance redoutable par suite de leur accroissement continu. Si ce fait était définitivement vérifié, il conduirait à un bouleversement complet des règles que l'on applique au calcul des dimensions des pièces métalliques.

Mais ce qui est vrai pour des métaux en fil, peut ne point s'appliquer aussi exactement à des pièces de section plus fortes, d'autant plus que dans le cas actuel la rouille, en exerçant peu à peu son action destructrice, a pu influencer les résultats. Aussi M. Considère a-t-il jugé nécessaire de reprendre ces essais, en les appliquant à des fils d'acier sur lesquels la rouille demeure sans influence, et bien qu'au moment de la publication de son Mémoire, ces essais n'eussent point eucore atteint une durée suffisante pour permettre de conclure avec certitude, il avait néanmoins constaté que ces allongements sont très inférieurs aux chiffres que Vicat a indiqués, et ne se produisent que pour des efforts plus considérables.

Efforts répétés. — Les expériences faites par MM. Wöhler et Spangenberg pour étudier la résistance des métaux aux efforts répétés se divisent en trois groupes. Le premier comprend celles faites sur des barreaux ronds qu'on faisait tourner sous une charge permanente en reproduisant ce qui se passe dans les

essieux de chemin de fer. Les fibres extrêmes de ces barreaux travaillaient donc ainsi alternativement par traction et par compression à chaque rotation, et ces efforts contraires et successifs avaient une égale intensité.

Le second groupe comprend les essais de flexion exécutés sur des barreaux rectangulaires. Dans les uns la charge variait alternativement de zéro à un maximum déterminé ; dans les autres, la charge variait d'un minimum à un maximum de même signe.

Enfin, le troisième groupe contient les résultats d'essais exécutés par traction directe.

La description des appareils employés par M. Wöhler nous entraînerait trop loin. On la trouverait dans ses Mémoires originaux et M. Considère se borne lui-même à en faire connaître le principe reposant sur l'emploi ingénieux d'un système de leviers et de ressorts, disposés de telle sorte que la durée de chaque action de l'effort maximum ne dépassait pas douze secondes. Nous n'entrerons pas non plus dans la discussion des résultats obtenus dans l'emploi de ces appareils, par M. Wöhler lui-même et par M. Spangenberg, continuateur de ses travaux. En n'en conservant que ce qui ressort réellement des faits et en mettant de côté les chiffres dont l'exactitude est contestable, ces résultats peuvent se résumer ainsi :

La répétition des efforts est pour les métaux une cause spéciale d'altération, dont l'effet n'est nullement proportionnel à la valeur absolue du maximum de l'effort.

Le cas le plus défavorable à la durée du métal est celui où l'effort varie entre deux valeurs égales et opposées, c'est-à-dire entre une tension et une pression d'égale intensité. La limite dangereuse de répétition est alors très inférieure à la limite d'élasticité, et probablement voisine de la moitié de cette quantité lorsque la durée des efforts maxima est de $\frac{1}{12}$ de seconde environ comme dans les essais de

M. Wöhler. On a la confirmation pratique de ce fait par les ruptures d'essieu, cette épée de Damoclès des administrations de chemin de fer, dont on n'arrive à combattre les funestes conséquences que par une surveillance et un contrôle de tous les instants.

Lorsque l'effort varie de 0 à un maximum constant et toujours de même signe, la limite dangereuse de répétition est voisine de la limite d'élasticité si la durée des efforts conserve la même valeur de $\frac{1}{12}$ de seconde.

Lorsque l'effort varie d'un minimum à un maximum de même signe, la limite dangereuse s'élève et dépasse d'autant plus la limite d'élasticité que le minimum est lui-même plus élevé.

Les limites dangereuses des efforts de même sens sont moins élevées pour la traction que pour la flexion.

Nous verrons plus loin comment la composition chimique des aciers peut, sans contredire les principes fondamentaux de ces lois, intervenir dans leur application.

Chocs répétés. — Les études précédentes s'appliquent à la répétition des efforts appliqués sans choc. Le choc vient introduire un nouvel élément de complication ; aussi l'étude de ces effets est-elle particulièrement difficile. Le danger des chocs répétés

est surtout considérable, si, au lieu d'une barre de section uniforme s'allongeant également dans toute sa longueur, il s'agit d'une barre présentant de nombreux changements de section comme presque toutes celles qui entrent dans les constructions. Les sections entières d'une telle barre travaillent à un effort bien moins élevé que les sections affaiblies, et par suite ne prennent que de faibles allongements élastiques par l'effet du choc, qui force au contraire celles-ci à subir des allongements permanents. Par suite, l'allongement total que peut prendre la barre avant de se rompre est bien moindre que celui que peut prendre une barre à section unique. On peut en conclure dès à présent que la force vive nécessaire pour produire la rupture par répétition est encore bien moins élevée pour les barres percées de trous de rivets que pour les barres à section constante, mais une théorie complète des chocs répétés ne pourra être présentée qu'après des expériences qui manquent encore aujourd'hui.

Après avoir ainsi parcouru toute la série des déformations des aciers auxquelles leur emploi les expose, nous allons revenir à l'étude de leur composition chimique. On voudra bien se souvenir toutefois qu'il s'agit surtout dans cette étude de rapports à établir, et qu'en pareil cas les sciences qu'on désigne aujourd'hui sous le nom de physique, chimie et mécanique empiètent fréquemment l'une sur l'autre. Voulons-nous, par exemple, établir le rapport existant entre la teneur en manganèse d'un acier et ses propriétés magnétiques, nous nous trouvons en présence d'une équation dont l'analyse chimique occupe un des membres, tandis que la physique réclame l'autre comme étant de son domaine ; s'agit-il d'étudier l'influence de ce même corps sur l'élasticité, c'est sur les confins de la physique et de la mécanique que se fait la rencontre. Il serait peut-être trop ambitieux de dire que le savant, l'ingénieur, l'industriel auxquels cette Encyclopédie est destinée, n'ignorent de rien ; mais on peut affirmer que, pour rester fidèles à leur mission, ils doivent avoir des élartés de tout ; aussi nous suivront-ils facilement, quand il ne leur arrivera pas de nous devancer, dans l'examen de ces questions complexes, qui pourraient rebuter des esprits moins exercés.

CHAPITRE III

INFLUENCE DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES ACIERS SUR LEURS PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES (*suite*)

I. — Influence des métalloïdes.

Influence du carbone. — C'est par le carbone que nous commencerons l'étude des corps qui interviennent avec le fer dans la constitution des aciers. On a vu que ce métalloïde ne s'y rencontre jamais seul, et qu'un carbure de fer pur, réalisable dans les laboratoires, est introuvable dans l'industrie ; mais si le carbone n'existe pas seul dans l'acier, il s'y rencontre toujours et y prédomine le plus souvent ; le premier rang lui revient donc d'une manière incontestable. D'ailleurs lorsque nous connaîtrons à fond ses actions si multiples, notre tâche pour les autres métalloïdes et métaux sera singulièrement facilitée, car il nous suffira le plus souvent d'indiquer s'ils agissent dans le même sens que lui, ou s'ils agissent en sens inverse.

La teneur minimum de carbone que l'on trouve dans les aciers les plus doux est de 0,10 à 0,15 pour 100 ; la teneur maximum est de 1,20 à 1,25 pour 100. On admet quelquefois que des composés ferreux dans lesquels le carbone s'élève jusqu'à 1,75 et même 2 pour 100 méritent encore le nom d'acières, mais ce sont plutôt des produits intermédiaires entre l'acier et la fonte, dont l'emploi est très restreint.

Quant à la limite inférieure, elle est également, et pour la même raison, difficile à déterminer. Avec une teneur de 0,50 pour 100, nous nous trouvons en présence d'un acier malléable, facile à souder et pouvant encore prendre la trempe ; une teneur de 0,25 pour 100 de carbone donne du fer à grains qui se trempe à peine ; une teneur de 0,05 ne donne que du fer doux homogène, ne se trempant plus. Au delà de cette limite on n'obtient plus par les procédés métallurgiques actuels qu'un métal court, sans ténacité ; c'est un fer brûlé rendu impropre par la présence de l'oxyde de fer. Toutes ces indications supposent, nous le rappelons encore, que le carbone prédomine beaucoup sur les autres éléments constituants ; si l'on avait entre les mains un acier dans lequel on aurait introduit artificiellement des quantités notables de manganèse ou de chrome, les indications relatives au carbone deviendraient absolument erronées.

On peut dire d'une manière générale que la *résistance et la propriété de prendre la trempe* augmentent avec la teneur en carbone des aciers, tandis que leur *ductilité* diminue. C'est ainsi que les aciers les plus carburés peuvent supporter une plus

forte charge que les aciers doux sans déformation permanente appréciable. Mais il est un fait bien important qui se dégage des expériences faites à l'occasion de l'Exposition de 1878 : c'est que tous les aciers prennent sous une charge donnée un même allongement, toutes les fois que la limite d'élasticité n'est pas dépassée ; la proportionnalité des charges aux allongements se continue plus loin pour les aciers durs que pour les aciers doux, mais l'allongement élastique reste très sensiblement proportionnel à l'effort. *Le module d'élasticité est donc constant pour tous les aciers* ; sa valeur est de 0,0044 par kilogramme quelle que soit la valeur de la traction, et quels que soient aussi le degré de dureté et la qualité de l'acier employé.

L'allongement permanent n'est pas soumis à une loi simple comme celle qui régit les allongements élastiques, et l'on voit la résistance à la rupture augmenter rapidement avec la teneur en carbone, tandis que l'allongement diminue. Nous mettons en regard, pour des aciers carburés de Terre-Noire, les chiffres qui expriment ces variations.

TABLEAU A

TENEUR EN CARBONE	RÉSISTANCE à la RUPTURE	ALLONGEMENT TOTAL	ALLONGEMENT DE STRCTION
0.15	35 kg.	31 p. 100	200 p. 100
0.49	48	22	67
0.80	66	11	22
0.87	70	5	9

L'examen du tableau fait voir qu'il n'y a pas de proportionnalité entre l'allongement total et l'allongement de striction. On reconnaît, de plus, que la teneur en carbone augmentant, l'allongement de striction diminue beaucoup plus rapidement que l'allongement total ; il donne par suite une idée plus exacte de la ductilité que l'allongement total, que dans la pratique on utilise seul aujourd'hui.

Le carbone exerce sur la résistance à la compression une influence analogue à celle qu'il exerce dans les phénomènes de traction simple. On a d'abord constaté que le coefficient et la limite d'élasticité sont sensiblement les mêmes dans les deux cas ; la limite d'élasticité s'élève également avec la dureté du métal, comme le montre le tableau suivant :

TABLEAU B

TENEUR EN CARBONE	CHARGE CORRESPONDANT A LA LIMITÉ D'ÉLASTICITÉ	
	ACIER BESSEMER	ACIER MARTIN
0.12	22.50	19.25
0.28	25.95	21.98
0.50	25.55	25.67
0.75	31.42	22.60
1.00	44.02	56.05

Comme pour la traction et la compression, la résistance au *cisaillement* varie dans les aciers avec la teneur en carbone. Pour le fer, de nombreux essais ont prouvé que la résistance au cisaillement perpendiculaire aux fibres est égale aux $\frac{80}{100}$ en moyenne de la résistance à la traction. Pour l'acier, le rapport est à peu près le même pour les qualités très douces, mais il est moins élevé pour les nuances plus dures, ainsi qu'il résulte des chiffres ci-dessous obtenus par M. Bauschinger.

TABLEAU C

TENEUR EN CARBONE	RÉSISTANCE	RÉSISTANCE	RAPPORT
	à la TRACTION	au CISAILLEMENT	des DEUX RÉSISTANCES
0.14	44.50	54.10	0.77
0.19	47.85	55.85	0.77
0.46	55.50	57.10	0.67
0.55	56.50	40.00	0.71
0.66	62.95	42.80	0.66
0.86	72.50	48.20	0.67
0.87	85.05	58.20	0.70

Résistance à la flexion. — Les essais à la flexion faits par Terre-Noire sur des prismes à section carrée de 100 millimètres¹ et par Reschitzka sur des prismes à section rectangulaire (700×140 millimètres) et des cylindres de 140 millimètres de diamètre ont conduit aux résultats suivants :

Dans l'essai par flexion, il y a élévation de la charge à la limite d'élasticité, élévation de la résistance maxima à la rupture, flèche moindre, avec élévation de la teneur en carbone. Les barres rondes, ainsi que dans les essais à la compression et à la torsion, se comportent mieux que les barres carrées ; elles supportent une plus forte charge à la limite d'élasticité et prennent une flèche moindre que ces dernières,

1. Il est entendu que les essais dont il est question dans ce chapitre ont toujours été faits sur des barreaux forgés ou laminés et non trempés. Dans le cas contraire il en sera toujours fait mention.

le tout étant bien entendu rapporté à l'unité, à l'aide des formules de résistance à la flexion des pièces posées sur deux appuis et chargées en leur milieu.

Le tableau ci-dessous, dû comme le précédent à M. Bauschinger, donne le rapport de la résistance à la traction et de la résistance à la flexion calculée d'après la formule $T = \frac{Mn}{I}$, dont nous avons fait connaître la signification au chapitre II. Il faut indiquer toutefois que les barreaux auxquels se rapportent les deux premières lignes du tableau n'ont pu être rompus par flexion. Leur résistance réelle à la flexion est donc supérieure aux chiffres indiqués.

TABLEAU D

TENEUR EN CARBONE	RÉSISTANCE		RAPPORT DES DEUX RÉSISTANCES
	A LA TRACTION	A LA FLEXION	
0.14	44.50	79.20	1.78
0.19	47.85	86.00	1.79
0.46	53.50	83.40	1.56
0.55	56.50	88.85	1.58
0.66	62.95	86.00	1.56
0.80	72.30	76.45	1.06
0.96	85.05	84.80	1.02

On voit par ce tableau que le rapport de la résistance de flexion à la résistance de traction est très élevé pour les aciers doux et très faible pour les aciers durs. Ce fait s'explique naturellement par les chiffres du tableau A, qui montrent que la striction est extrêmement forte pour les aciers extra-doux et très faible pour les aciers carburés durs. Pour les premiers, l'allongement de striction est voisin de $\frac{200}{100}$; la section contractée n'est par suite que le tiers de la section primitive et la résistance de striction est plus que double de la résistance rapportée à la section primitive. La résistance à la flexion doit être relativement énorme pour un tel métal, puisqu'elle se règle sur la résistance de striction.

Au contraire pour les aciers carburés, à 70 kilogrammes de résistance, l'allongement de striction n'a plus que la valeur insignifiante de 9 pour 100 et la résistance de striction est par suite très peu supérieure à la résistance usuelle. Un tel métal ne peut que résister fort mal à la flexion.

Les études relatives à l'*influence des efforts et des chocs continus et répétés* sont de date trop récente pour que l'on puisse, dès à présent, préciser la résistance que la teneur en carbone des aciers leur permet d'opposer à ces efforts. Mais on ne saurait trop les recommander aux ingénieurs, car elles conduisent à la solution d'un problème dont la donnée est la suivante :

Étant donné un organe de machine en acier, de dimensions connues, et dont la rupture a eu lieu, quelles sont, si l'on emploie un acier de même composition, les dimensions qu'il convient de donner à la pièce nouvelle, pour lui assurer dans les

mêmes conditions de travail une durée indéfinie ? Les essais de M. Wöhler par traction et par flexion d'un seul côté sont trop peu nombreux pour qu'on puisse en tirer des chiffres certains ; mais il n'en est pas de même des essais par rotation sous charge constante qu'il a faits en très grand nombre, et l'on peut en déduire des règles certaines pour une intéressante catégorie de pièces mécaniques, celle des arbres ou axes de tout genre, pourvu qu'ils soient faits en métal semblable à l'un de ceux que M. Wöhler a étudiés. Le tableau suivant donne pour les axes, en regard du nombre de tours qui a amené la rupture, l'augmentation de force qu'il faut donner à la pièce en remplacement pour qu'elle dure indéfiniment.

NOMBRE DE TOURS QUI A AMENÉ LA RUPTURE DE LA PIÈCE A REMPLACER	AUGMENTATION DE FORCE QU'IL FAUT DONNER A LA PIÈCE	
	SI ELLE EST EN FER	SI ELLE EST EN ACIER DE BURETÉ MOTTEUX
50.000	1.90	1.45
100.000	1.80	1.50
500.000	1.60	1.20
1.000.000	1.40	1.15
2.000.000	1.30	1.10
5.000.000	1.20	1.06
10.000.000	1.05	1.02

On voit dès à présent de quelle utilité peut être la connaissance de ces chiffres dans des études pratiques qui auraient pour but de substituer l'acier au fer dans le matériel roulant des chemins de fer, qui ne font point encore usage d'essieux en acier doux, et désireraient se bien fixer sur les conditions de travail de ce métal avant d'en ordonner l'emploi.

Il nous reste à dire un mot de l'influence du carbone sur trois opérations auxquelles l'acier est constamment soumis dans ses traitements industriels, à savoir : *la fusion*, *la soudure* et *la trempe*, avec son corollaire souvent indispensable, le *recuit*; cet examen sera forcément incomplet parce que les autres corps dont le carbone est accompagné exercent sur ces propriétés de l'acier une influence dont l'étude ne cesse pas d'être à l'ordre du jour, et que nous aborderons plus complètement dans un des chapitres suivants.

On admet ordinairement comme point de fusion des fontes une température de 1500° à 1700° centigrades, et pour le fer d'au moins 2000°; les aciers formant une série continue entre ces deux extrêmes fondront à toutes les températures intermédiaires, et ces températures s'élèveront en rapport inverse de la teneur en carbone ; l'obtention de ces hautes températures est, grâce aux cornues Bessemer et aux fours Siemens, devenue un jeu pour l'industrie moderne; la difficulté n'est plus que d'obtenir des matériaux assez réfractaires pour résister longtemps aux traitements métallurgiques qui les exigent.

La propriété si précieuse que possède le fer de se souder est possédée par les aciers doux ; elle a même été souvent employée dans les classifications pour différencier cet acier doux des aciers dits demi-durs et durs ; elle peut être parfaite,

mais exige quelques soins, qui permettent de la réaliser sans altérer la qualité de l'acier. Les aciers suédois qui ont pu être étudiés aux diverses expositions, et se signalent par leur pureté, commencent déjà à se souder lorsque leur teneur en carbone est descendue au-dessous de 1,25 pour 100; avec 1 pour 100 ils se soudent bien entre les mains d'un ouvrier habile; la teneur de 0,75 pour 100 donne un acier se forgeant et se soudant *bien*: c'est l'acier ordinaire, qui passe ensuite à un acier se forgeant et se soudant *très bien*, c'est l'acier doux, avec 0,50 pour 100 de carbone; au-dessous de cette limite, ces deux qualités se maintiennent, mais c'est alors la trempe qui commence à diminuer.

Les aciers styriens, obtenus comme en Suède avec des fontes très pures, ont toujours passé pour des produits dans lesquels l'influence du carbone se fait particulièrement sentir, et nous y constatons à peu près la même variation que pour les aciers suédois; là aussi l'acier à 1 pour 100 de carbone ne peut se souder que si l'ouvrier est habile; c'est encore de l'acier dur; une diminution de la teneur en carbone de 0,25 pour 100 rend cette opération facile et sûre, mais il faut le répéter, d'autres éléments peuvent, même dans ces aciers, rehausser ou contrarier la facilité du soudage, en sorte que les proportions ci-dessus indiquées n'ont en réalité qu'une valeur relative.

Il en est de même pour l'influence de la teneur en carbone sur la trempe. Avec une teneur de 0,25 les aciers suédois, comme les aciers styriens, se trempent à peine, tandis que cette singulière aptitude que nous aurons à étudier longuement, s'épanouit en quelque sorte à partir de cette limite inférieure pour se maintenir à travers toute la série des aciers et des fontes jusqu'aux fontes graphitcuses, dont la surface pâlit et dure par une brusque immersion dans l'eau; mais encore une fois le carbone n'est pas seul à l'influencer, et le silicium auquel nous passons maintenant n'est certainement pas étranger non plus plus aux phénomènes qui l'accompagnent.

Influence du silicium. — Comme le carbone, le silicium se rencontre dans toutes les fontes, et par suite, au moins à l'état de traces, dans tous les aciers. Sa présence tient à la nature des gangues qui accompagnent les minerais de fer, et renferment toutes de la silice en proportions plus ou moins considérables. Dans le traitement au haut fourneau la plus grande partie de cette silice se combine avec les bases terreuses telles que la chaux, la magnésie, l'alumine, et aussi un peu avec les oxydes de fer et de manganèse en présence desquels elle se trouve, mais une réduction partielle est inévitable, de sorte que les fontes obtenues au haut fourneau contiennent du silicium dans une proportion rarement inférieure à 0,20, mais qui peut quelquefois s'élever jusqu'à 4 et 5 pour 100. On peut, d'autre part, obtenir au laboratoire de véritables alliages de fer et de silicium, à peu près exempts d'autres corps et dont la teneur peut s'élever jusqu'à 8 pour 100.

On admet communément que le silicium agit sur les aciers dans le même sens que le carbone; de plus leurs effets se superposent comme le montre l'expérience suivante faite par M. Mrazek, professeur à l'École des mines de Pzibram en Bohême, dont la contribution à l'étude actuelle mérite d'être signalée.

Cet expérimentateur a reconnu, en fabriquant au creuset des aciers siliceux sans manganèse, qu'avec une teneur de 0,20 pour 100 de carbone et au-dessous, la quantité

de silicium qui laisse eneore à l'acier sa malléabilité peut s'élever à 1 pour 100. Mais avec une proportion en carbone s'élevant jusqu'à 0,40, l'acier devient rouverin¹ et ne paraît plus pouvoir se laminer.

Si au contraire la teneur en silicium ne monte pas au delà de 0,40 à 0,50 pour 100, une teneur à peu près égale en carbone donne des aciers appropriés; enfin une teneur de 0,15 à 0,20 pour 100 de silicium est admissible dans des aciers qui par leur teneur en carbone doivent déjà être rangés parmi les aciers demi-durs.

Qu'il nous soit permis de recourir à quelques souvenirs personnels pour montrer quelle grande importance peut avoir dans certaines circonstances l'influence du silicium sur la qualité des aciers à chaud. Étant en 1869 ingénieur chargé de l'atelier Bessemer des usines de Saint-Jacques à Montluçon, appartenant à la Société anonyme des forges de Châtillon et Commentry, nous avons eu l'occasion de prendre part à cette époque aux efforts faits par M. Lan, dont les travaux sont connus de tous les métallurgistes, pour employer à la fabrication de l'acier Bessemer les minerais en grains du Berry. Ces minerais, dont la teneur en fer s'élève rarement au-dessus de 40 pour 100, sont accompagnés d'une gangue argileuse très réfractaire, de sorte que le mineraï contient au moins 15 pour 100 de silice et une proportion d'alumine à peu près égale. Ce mineraï fondu en allure chaude, avec un coke tenant près de 20 pour 100 de cendres, devait nécessairement donner des fontes très chargées de matières étrangères, et dans lesquelles le silicium à lui seul atteignait fréquemment 5 pour 100. Toutes les tentatives faites pour les transformer en acier Bessemer restèrent infructueuses. Sans parler des difficultés spéciales résultant d'une opération dans laquelle on obtenait un métal fondu à une température excessive, l'acier, quelque loin que fût poussée l'opération, renfermait toujours des quantités de silicium assez notables pour rendre son laminage incertain. Même en brûlant dans la dernière période de l'opération une quantité de fer considérable, qui obligeait à une addition finale de spiegel assez souvent dangereuse par la réaction qu'elle occasionnait, on n'arrivait pas à brûler assez le silicium pour en purifier le bain métallique, et il en restait une quantité assez grande pour que, jointe à la forte teneur en carbone résultant de la grosse addition de spiegel, elle rendit le métal rouverin. On tombait fréquemment sur des aciers tenant 0,60 de silicium avec 0,50 à 0,70 de carbone, et dépassant par suite la limite indiquée par M. Mrazek, dont les essais concordent bien, comme on le voit, avec la pratique métallurgique. La fabrication à Saint-Jacques ne suivit une marche rationnelle qu'à partir du moment où M. Mussy, ingénieur en chef des mines, ayant pris la direction de l'usine, mit fin à des tentatives dont il avait promptement reconnu l'inutilité.

Nous venons de voir par cet exemple l'influence que le silicium exerce à chaud sur les aciers; quels sont à froid les effets de ce métalloïde?

Les nombreuses expériences faites à l'usine de Montluçon, lors des essais de fabri-

1. Nous rappelons ici qu'on appelle dans la pratique des usines *métal rouverin* celui qui ne possède pas à chaud la malléabilité et la ductilité désirées. C'est, autrement dit, un métal cassant à chaud. On désigne sous le nom de *criques* les solutions de continuité assez accentuées pour donner à la surface du métal, et surtout à ses angles, l'aspect d'une denture plus ou moins profonde, et sous le nom de *pailles* les petites écailles qui couvrent quelquefois ces surfaces, et sont également l'indice d'un manque d'homogénéité de la matière. Nous aurons très fréquemment à faire usage de ces expressions.

cation dont nous avons parlé, montrent qu'un métal capable de supporter le laminage peut renfermer une quantité de silicium suffisante pour altérer sa résistance au choc et le rendre cassant. Les aciers siliceux devront donc être soigneusement évités pour les pièces soumises à des flexions et à des chocs répétés, comme les rails de chemins de fer. Au point de vue de la résistance et de l'allongement sous les charges appliquées sans choc, le silicium n'est pas nuisible ; il augmente la résistance et diminue l'allongement, mais avec un coefficient moindre que le carbone. C'est ce qui ressort des essais répétés faits par Terre-Noire sur les aciers coulés sans soufflage par addition finale d'alliages siliceux, fabrication qui y a été créée par M. Euverte et sur laquelle d'intéressants renseignements ont été fournis à plusieurs reprises par M. Gautier, à qui nous devons de nombreuses publications sur les questions métallurgiques les plus nouvelles. Ces aciers coulés sans soufflures se comportent à la traction et à la flexion continues absolument comme les aciers martelés ou laminés de même composition chimique, et l'augmentation de charge à la rupture due au silicium paraît être le 1/6 seulement de celle due à une quantité égale de carbone. Pour les faibles teneurs cette influence est négligeable, mais pour les teneurs voisines de 0,20, 0,50 ou 0,40 pour 100, on peut dire que 0,10 de silicium correspond à une augmentation ou à une diminution de 5 kilogrammes par millimètre carré de charge à la rupture, mais que par contre l'allongement pour 100 n'est diminué que de 0,50 à 0,60 pour 100.

Influence du soufre. — Le soufre se rencontre, au moins, à l'état de traces dans la plupart des aciers. Les minerais de fer renferment en effet presque toujours des quantités appréciables de pyrite de fer, et les meilleurs d'entre eux, tels que les minerais spathiques de Styrie, les minerais magnétiques de Suède et de Hongrie, n'en sont pas exempts. Les cokes de leur côté apportent dans les lits de fusion une certaine proportion de ce métalloïde. L'allure chaude et basique qui convient à la production des fontes Bessémer permet, il est vrai, d'en éliminer la plus grande partie dans le haut fourneau lui-même, et l'odeur bien caractéristique des laitiers obtenus dans cette allure ne laisse aucun doute sur l'efficacité de cette élimination, mais elle ne peut être achevée dans la cornue Bessemer ou dans les autres appareils d'affinage, et les derniers restes du soufre se retrouvent dans le produit fini. Nous avons réuni ci-dessous les teneurs en soufre d'un certain nombre d'acières.

Acier fondu de Krupp pour canons.	traces
Acier puddlé d'Ebbwale.	0,002
Acier Bessemer de Dowlais pour rails.	0,050
Acier Bessemer de Neuberg (Styrie)	traces
Acier Bessemer de Grätz (Styrie)	0,050
Acier fondu au creuset de Kapfenberg (Styrie). . .	0,010
Acier Bessemer déphosphoré de Witkowitz (Moravie). . .	0,020
Acier Bessemer déphosphoré de Sheffield.	0,075

Comme on le voit, la teneur constatée varie entre d'assez larges limites ; elle augmente dans les aciers qui doivent être obtenus en grande masse, et en parti-

euilier dans les lingots pour rails ; elle se réduit à des traces dans les produits tout à fait supérieurs tels que les aciers pour canons de Krupp et pour ceux qui doivent être soumis à un travail à chaud particulièrement délicat. C'est alors en effet que le soufre intervient de la manière la plus fâcheuse, et quand il existe en quantité notable il rend le laminage et le martelage très difficiles ; le métallurgiste possède, il est vrai, dans ce cas un correctif par l'introduction dans le bain métallique de spiegeleisen ou mieux de ferromanganèse avant la coulée, mais même dans ce cas l'emploi d'un acier sulfureux ne présente pas toutes les garanties désirables, car dans les essais à froid on aura souvent, à côté de bons résultats, des résultats anomaux, et des allongements toujours très faibles et irréguliers en ce qui concerne les essais à la traction.

Influence du phosphore. — Le phosphore est, comme le soufre, amené dans les fontes et dans les aciers par les minéraux et par les combustibles. Les phosphates sont abondamment répandus dans la nature organique et inorganique, et il n'est pas surprenant de les voir arriver plus ou moins dissimulés dans la cuve du haut fourneau ; mais tandis que le soufre disparaît en grande partie, entraîné par les laitiers, le phosphore se concentre dans la fonte pour passer dans l'acier dont il est comme le silicium un ennemi. Aussi les fontes phosphoreuses, recherchées dans les fonderies par suite de leur grande fluidité, étaient-elles de la part du fabricant d'acier l'objet d'une aversion méritée. L'emploi du convertisseur Bessemer basique et du surcouplage est venu leur donner, il y a cinq ans environ, une valeur toute nouvelle. Nous entrerons dans de nombreux détails sur cette remarquable évolution de la métallurgie, dans le chapitre consacré au procédé Bessemer ; nous ne pouvons pour le moment qu'en signaler toute l'importance.

Le tableau suivant indique la teneur en phosphore d'un certain nombre d'aciers.

Aacier Bessemer de Gratz	traces
Aacier Bessemer doux de Neuberg	0,044
Aacier Bessemer pour rails de Dowlais	0,090
Aacier de Krupp pour canons	0,020
Aacier puddlé d'Ebbwale	0,096
Aacier déphosphoré de Witkowitz (Moravie)	0,050
Aacier déphosphoré de Sheffield)	0,050
Aacier Pernot d'Anina (Hongrie)	0,071
Aacier Bessemer de Reschitzka	0,059

L'influence du phosphore sur les aciers a été tout particulièrement étudiée à l'usine de Terre-Noire, et les résultats obtenus ont été résumés par M. V. Deshays, dans un tableau souvent reproduit et qui renferme sous une forme claire et précise un grand nombre de renseignements. Le même auteur a fourni pour le supplément du *Dictionnaire de chimie* de Wurtz un article sur les aciers auquel nous avons fait plusieurs emprunts.

Il résulte de ces divers travaux : 1° que l'allongement n'est pas diminué par la présence de 0,30 et même de 0,40 de phosphore, dans les aciers dits phosphoreux fondus et qui ne contiennent généralement que 0,20 à 0,50 de carbone.

2° Que le phosphore exerce une très grande influence sur la charge à la limite d'élasticité et sur la résistance maxima à la rupture ; c'est ainsi que pour des aciers contenant d'une manière à peu près constante 0,50 de carbone, 0,70 de manganèse et des traces à peine sensibles de soufre et de silicium, la teneur en phosphore s'élevant de 0,25 à 0,40, la charge correspondant à la limite d'élasticité est montée de 54^{kg},57 à 59^{kg},25, et la résistance maxima à la rupture de 56^{kg},66 à 62^{kg},01, la striction restant la même, et diminuant plutôt légèrement. On voit donc que, toutes choses égales d'ailleurs, 0,10 de phosphore augmente la résistance maxima à la rupture d'environ 1^{kg},500 par millimètre carré. La charge à la limite d'élasticité est elle-même fortement affectée, puisqu'elle atteint 62 p. 100 de la résistance maxima à la rupture. On peut donc dire d'une manière générale que le phosphore rend les aciers rigides et élastiques, mais l'absence de striction rend dangereux dans le travail par flexion ceux qui en contiennent des quantités notables, à moins que la teneur en carbone ne diminue dans le rapport inverse, et que le manganèse n'intervienne comme correctif pour augmenter la flexibilité.

Un autre caractère des aciers phosphoreux est leur fragilité qui devient grande dès que la proportion de phosphore dépasse 0,25, même lorsque la teneur en carbone reste voisine de 0,50. Ils résistent donc difficilement aux chocs, et c'est là ce qui les rend surtout dangereux pour la plupart des emplois, malgré les résultats satisfaisants qu'ils donnent au point de vue de la résistance et de l'allongement statique.

La défiance qu'ils inspirent à cet égard est d'autant plus grande que le phosphore, loin de s'opposer au laminage de l'acier comme le silicium et le soufre, semblerait plutôt le faciliter. On peut laminer sans difficulté sous forme de rails des lingots qui en renferment jusqu'à 0,10 pour 100 et même plus, à la condition qu'ils soient peu carburés, mais gare aux épreuves au choc lorsque viendra l'agent réceptionnaire ! M. Considère qui, à la fin de son mémoire, examine, comme nous le faisons ici l'influence de la composition chimique des aciers sur leurs propriétés physiques, reproche en outre aux aciers phosphoreux d'avoir une structure feuillettée qui rend irrégulière la qualité du métal et en facilite la désagrégation. Cette structure générale feuillettée que des yeux exercés peuvent même, affirme-t-il, distinguer dans les cassures, permettrait de reconnaître sans analyse la présence d'un excès de phosphore. C'est là une indication nouvelle et qui mérite d'être signalée.

On trouvera peut-être après cet examen que c'est être sévère que de traiter le phosphore en ennemi de l'acier comme nous l'avons fait d'abord, en nous appuyant du reste sur l'autorité de M. Fremy et de ceux qui ont étudié après lui les combinaisons de ce métalloïde avec le fer. C'est dans tous les cas un voisin incommodé, et les études de Terre-Noire avaient pour but d'établir une sorte de *modus vivendi* du phosphore avec le carbone en interposant entre eux le manganèse. La déphosphoration a, comme son nom l'indique, apporté un remède radical à cette situation équivoque, et rendu le phosphore inoffensif par la voie la plus sûre, celle de l'élimination.

Nous avons épousé avec le phosphore la série des métalloïdes qui se rencontrent dans l'acier en proportions assez notables pour que l'étude de leur influence soit à la fois possible et utile. Il faut bien se rappeler que ces corps ne sont pas les seuls qui puissent entrer dans la composition des aciers. Nous avons déjà eu l'occasion

de montrer le rôle de l'oxygène et de l'azote en analysant les travaux de M. Fremy, et il nous faudra examiner le rôle tout spécial de ce dernier gaz lorsque nous traiterons de la cémentation. Pour en revenir aux autres métalloïdes qui se présentent ordinairement à l'état solide, la plupart peuvent, au laboratoire, se combiner avec le fer; ils agissent le plus souvent comme le soufre et le phosphore auxquels M. Fremy avait donné la désignation heureuse de *dominateurs*, voulant indiquer par là leur tendance à expulser les autres corps de l'acier, pour pouvoir y être tolérés sans en altérer gravement les propriétés; on pourrait donc arriver à cette conclusion que les métalloïdes se supportent mal les uns à côté des autres dans l'acier, tandis que les métaux, comme le chapitre suivant le montrera, sont plus tolérants l'un pour l'autre et même vis-à-vis des métalloïdes eux-mêmes.

CHAPITRE IV

INFLUENCE DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES ACIERS SUR LEURS PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES (*suite et fin*)

II. — Influence des métaux.

Influence du manganèse. — Dans ses travaux sur l'aciération publiés en 1865, M. Fremy signalait déjà l'influence que quelques métaux, et en particulier le manganèse, pouvaient exercer sur les qualités de l'acier. « De tous les métaux, disait-il, il n'en est pas qui soit plus utile dans l'aciération que le manganèse. Ce métal peut agir sur l'acier de deux manières différentes : 1^e Il se comporte d'abord comme épurateur, en déterminant par la fusibilité du silicate de manganèse l'élimination des métalloïdes en excès qui nuisent à l'aciération. 2^e Il s'allie au fer et communique à l'acier des propriétés précieuses ; il lui donne du corps et de l'homogénéité en devenant alors un élément constitutif de l'alliage : ce point important de l'aciération si souvent contesté a été établi directement en ajoutant du manganèse métallique dans de l'acier fondu et en le coulant immédiatement ; on a constaté ainsi une amélioration considérable du produit. Tous ces faits rendent compte de l'importance que les fabricants d'acier attribuent à l'emploi des fontes manganésifères dans la fabrication des fers aciéreux, et à l'intervention du peroxyde de manganèse dans la fusion de l'acier au creuset. »

Tous les travaux postérieurs n'ont fait que confirmer la justesse de cet exposé ; il est vraiment intéressant d'en rapprocher, à vingt années de distance, ce que dit à ce propos M. Considère dans son mémoire tout récent, inspiré par les expériences de Terre-Noire dont il sera question plus loin.

« Le manganèse, dit M. Considère, est un élément nécessaire de la fabrication industrielle de l'acier. Ajouté au bain métallique à la fin de l'opération, lorsqu'il n'y préexiste pas en quantité suffisante, il s'oxyde aux dépens d'une partie de l'oxyde de fer mélangé au métal, et forme avec ce qui en reste et avec la silice provenant de l'oxydation du silicium et de l'usure des revêtements, une scorie très liquide qui se sépare parfaitement du métal. Si l'on n'employait pas le manganèse, une partie de l'oxyde de fer resterait dans le métal et le rendrait rouvier et absolument incapable de supporter le laminage. Par suite de nécessités pratiques qu'il est inutile d'expliquer, il est impossible de n'ajouter au bain d'acier que la quantité de manganèse qui devra passer dans la scorie, et il en reste toujours au moins 0,15 à 0,20 pour 100 dans les aciers doux et 0,20 à 0,50 dans les aciers durs. Du reste, dans ces proportions le manganèse ne nuit pas à la qualité de l'acier ; il

joue le même rôle que le carbone, mais il diminue moins que lui les allongements à égalité d'augmentation de résistance. Par conséquent le manganèse améliore l'acier au point de vue du travail total de déformation, et augmente sa résistance au point de vue des efforts appliqués sans choc. Mais le grand avantage du manganèse est de donner aux aciers durs une grande résistance, tout en leur conservant une ductilité suffisante, ce qui ne peut être obtenu avec le carbone seul. »

Les avantages indiqués par M. Considère sont précisément ceux que M. Fremy signalait en disant que le manganèse donne à l'acier du corps et de l'homogénéité. La fabrication des fontes manganésifères, et leur emploi si précieux dans les cornues Bessemer et les fours Martin, est venue donner à son opinion une considération pratique. Aussi depuis quelques années les mines de manganèse sont-elles l'objet des recherches les plus actives ; plusieurs compagnies françaises ont fait l'acquisition de gisements situés hors de nos frontières, et les aciéries soucieuses d'assurer leur avenir feront bien de mettre la main sur ceux de ces gîtes qui seraient encore inexploités.

Les expériences de Terre-Noire ont pour le manganèse comme pour le phosphore, ou plutôt pour le manganèse en même temps que pour le phosphore, puisque l'un de ces corps servait de correctif à l'autre, beaucoup contribué à l'étude des aciers manganésés. Avant d'en résumer ici les caractères, il convient de dire un mot des travaux de M. Mrazek, dont le nom a déjà été prononcé à propos du silicium. D'après lui, le manganèse facilite le travail à chaud de l'acier, non seulement au rouge, mais surtout au blanc ; il craint la présence du carbone, mais à un bien moindre degré que le phosphore et le silicium dont M. Mrazek rapproche les propriétés chimiques (avidité pour l'oxygène, formation d'acides énergiques, composés hydrogénés peu stables, etc.), et qui tous deux, dit-il, rendent l'acier fragile lorsqu'il contient une quantité notable de carbone. Avec le manganèse au contraire M. Mrazek a obtenu un alliage de composition suivante :

Fer	98,24
Manganèse	1,58
Carbone	0,38
Silicium.	n n
Total.	100,00

Cet alliage constitue un véritable acier présentant une supériorité marquée sur les aciers au carbone et sur les aciers siliceux. D'après le même auteur, un acier doux par le carbone, c'est-à-dire en tenant 0,20 à 0,40 pour 100, peut renfermer jusqu'à 4 pour 100 de silicium et 1 pour 100 de manganèse sans cesser d'être éitable, et un acier dur à 1,50 de carbone peut renfermer, sans devenir rouvierin, 0,25 de manganèse et 0,45 de silicium.

Ces expériences avaient surtout en vue le travail de l'acier à chaud. L'usine de Terre-Noire présentait de son côté à l'Exposition de 1878 une série d'acières obtenus au four Martin en grandes masses, ayant une teneur à peu près constante en carbone et autres éléments étrangers, et une proportion de manganèse variant de 0,50 à 2,50 pour 100. C'est sur ces aciers qu'ont été faites des expériences qui peuvent se résumer ainsi.

Le manganèse a sur la résistance une influence un peu moindre que celle du carbone, et si l'on admet avec Terre-Noire qu'aux environs de 0,50 de carbone, une augmentation ou une diminution de 0,10 dans la teneur fait monter ou descendre la charge de rupture de 6 kilogrammes environ par millimètre carré, on peut dire, et cela est très près de la vérité, qu'autour de 0,50 de manganèse, 0,10 en plus ou en moins de cet élément augmente ou diminue la charge de rupture de 1^{1/2},80 à 2 kilogrammes par millimètre carré.

Le manganèse éloigne également la limite d'élasticité, et si dans les aciers carburés cette limite est voisine de 45 à 50 pour 100 de la charge de rupture, elle s'élève jusqu'à 55 pour 100 pour les aciers manganésés. C'est là un fait important pour la fabrication des aciers devant supporter de fortes charges sans se déformer d'une manière permanente.

Comme pour tous les corps étudiés jusqu'à présent, l'allongement diminue avec l'augmentation de la teneur en manganèse, mais dans une faible proportion, car cette influence n'atteint que $\frac{1}{7}$ à $\frac{1}{8}$ de celle du carbone. C'est ainsi que 0,10 de carbone en plus diminue l'allongement de 4 pour 100, tandis que la même proportion de manganèse ne le diminue que de 0,50. Il résulte cette augmentation de charge, combinée avec une faible diminution de l'allongement, une augmentation considérable du travail de résistance vive à la rupture, qui devient supérieure à celui des meilleurs aciers carburés.

La ductilité influant, comme nous l'avons vu, sur la flexion, les mêmes avantages se manifestent dans ce mode de travail; on constate dans les aciers manganésés une augmentation très considérable de la charge à la limite d'élasticité, une faible flèche, c'est-à-dire une grande raideur, et en outre une très forte résistance à la rupture, contrairement à ce qui a lieu pour les aciers carburés, pour lesquels une haute limite d'élasticité correspond à une charge de rupture par flexion relativement faible. Le manganèse peut donc être employé utilement jusqu'aux teneurs voisines de 1 pour 100, pour obtenir des pièces pouvant supporter sans déformation de grands efforts de flexion, de torsion comme les essieux, les manivelles, les arbres coudés et en général toutes pièces de machines. Au-dessus de cette limite, les aciers manganésés deviennent fragiles lorsque la teneur en carbone est voisine de 0,50.

Toutes ces conclusions s'appliquent, bien entendu, au métal recuit; dans le cas de pièces devant être trempées, on ne pourrait pas employer les aciers extra-manganésés, vu la fragilité qu'apporte le manganèse à la trempe, comme nous le reconnaîtrons en étudiant d'une manière générale la trempe au chapitre suivant. Cette opération est d'ailleurs inutile pour la plupart des pièces de machines mentionnées ci-dessus.

Influence du chrome. — Dans ses études sur la constitution des aciers, M. Fremy avait également reconnu la possibilité d'associer le chrome au fer pour obtenir une variété d'acier chromé. Il préparait cet alliage en faisant fondre au creuset brasqué 10 parties de fer chromé naturel, 6 parties de battitures de fer, et 10 parties de verre ne contenant pas de bases métalliques. Il se formait ainsi un culot représentant 7 parties en poids; le composé était alors combiné avec de l'acier dans une proportion telle que le chrome représentait de 1 à 2,5 pour 100 du poids

du produit. M. Fremy reconnut à cet alliage quelques propriétés qui pourraient, disait-il, en rendre l'usage précieux pour certains usages ; il constatait toutefois que l'union intime des deux métaux était assez difficile à réaliser.

Ces indications étaient restées longtemps inutilisées quand l'Exposition de 1878 a montré une fois de plus que les recherches patientes du laboratoire, lorsqu'elles reposent sur un principe indiscutable, finissent tôt ou tard par trouver leur application utile dans l'industrie. Les aciers chromés, d'abord exclusivement fabriqués en Amérique et en Angleterre, étaient présentés à l'Exposition par deux établissements français, la Société de Terre-Noire et les Aciéries d'Unieux, appartenant à M. Holzer et Cie. On a reconnu à Terre-Noire qu'un barreau pris dans un lingot d'acier chromé coulé sans soufflures donnait 86 kilogrammes de résistance à la rupture avec 50 pour 100 d'allongement, joints à une bonne résistance au choc ; ces aciers se sont en outre particulièrement bien comportés aux essais par compression.

Des essais à la traction faits sur deux échantillons d'aciers chromés d'Unieux, dont nous ne possédons malheureusement pas l'analyse complète, ont donné les résultats suivants.

	PREMIER ÉCHANTILLON	DEUXIÈME ÉCHANTILLON
Limite d'élasticité	46.0	59.0
Charge de rupture	72.0	92.0
Allongement total	55.0	44.5
— de striction	220.0	64.0

On voit que dans le premier échantillon, qui est évidemment plus doux que l'autre, le rapport des deux allongements atteint un chiffre tout à fait exceptionnel. Nous avons vu que ce rapport, qui est voisin de 2 pour les aciers simplement carburés, ne dépasse pas 3,5 pour les aciers les plus riches en manganèse. Le chrome agit donc dans le même sens que ce dernier métal, mais d'une manière encore plus prononcée, et il y a lieu de reconnaître dès à présent une supériorité incontestable des aciers chromés sur les aciers ordinaires. Comme M. Considère le fait remarquer, on ne possède encore pour eux aucun essai de rupture par flexion, mais la valeur énorme de leur allongement de striction porte à conclure qu'ils doivent avoir une résistance à la rupture par flexion très exceptionnelle. Ce fait est confirmé par la difficulté extrême que l'on éprouve à les briser au marteau, même après les avoir incisés avec la tranche, tandis que dans les mêmes conditions, les aciers carburés d'égale résistance se brisent au premier choc. Si donc leur usage ne s'est pas jusqu'à présent plus répandu pour les pièces qui exigent à la fois une grande résistance et beaucoup de ductilité, cela tient évidemment aux difficultés actuelles de leur coûteuse fabrication. Ces difficultés ne sont pas insurmontables ; c'est ainsi que M. Mussy a pu obtenir dans les hauts fourneaux de Saint-Jacques des fontes tenant jusqu'à 20 pour 100 de chrome, et constituant ainsi un produit industriel d'une réelle valeur. D'autre part, si les minerais de chrome sont jusqu'à présent moins exploités, et par suite plus chers que ceux de manganèse, c'est que l'utilisation de ce métal n'avait pas jusqu'à présent encouragé la recherche de ces minerais. Le fer chromé,

le plus commun parmi eux, présente l'avantage de fournir le chrome déjà associé au fer, et la France en possède à la Nouvelle-Calédonie des gisements considérables.

Influence des métaux voisins du manganèse et du chrome. — Les deux métaux dont l'action sur l'acier vient d'être étudiée, appartiennent, ainsi que le fer lui-même, au groupe désigné sous le n° 5, dans l'ancienne classification de Thénard, modifiée par Regnault; c'est celui des métaux se combinant avec l'oxygène aux températures élevées, donnant des oxydes irréductibles par la chaleur, et décomposant l'eau à la température du rouge sombre, ou à la température ordinaire en présence des aides énergiques. Parmi les autres métaux de ce groupe, il en est trois, le zinc, le cobalt et le nickel, qui se rencontrent assez fréquemment dans les minerais de fer. Le zinc, par suite de sa grande volatilité, doit disparaître à peu près complètement dans le traitement au haut fourneau et ne mérite pas d'entrer en compte; quant au nickel et au cobalt, on les retrouve dans certaines fontes. Grüner, dans son mémoire de 1867 déjà mentionné, en cite plusieurs renfermant du nickel et du cobalt et donne la composition d'un acier Krupp contenant jusqu'à 0,12 pour 100 de ces deux corps. Leur influence n'a pas été jusqu'à présent étudiée, et elle ne paraît pas être nuisible; ils se présentent d'ailleurs assez rarement et en assez petite quantité pour rendre cette étude à peu près superflue.

Influence du tungstène. — Parmi les métaux du quatrième groupe, il en est un dont l'alliage avec l'acier est connu et pratiqué depuis longtemps: c'est le tungstène. Les expériences les plus intéressantes sur cette question ont été faites par M. Jacob de Vienne avec le concours de MM. Koller et Sperl. Elles montrent que l'acier fondu renfermant 4 à 5 pour 100 de tungstène acquiert des propriétés spéciales et devient capable de prendre à la trempe une dureté tout à fait extraordinaire; des outils faits avec cet acier sont capables d'entamer au tour des objets en acier fondu ordinaire également trempé. Pour le préparer, on introduit dans un creuset brasqué et chauffé pendant trois heures au rouge blanc du wolfram purifié par grillage, pulvérisation, levigation et par un traitement final à l'aide chlorhydrique. Il y a réduction du minerai et l'on obtient une masse poreuse grise formée de tungstène métallique allié à des carbures de fer et de manganèse. C'est ce produit qui est utilisé pour la fabrication de l'acier tungstifère, en l'ajoutant dans les creusets qui servent à fabriquer l'acier fondu.

Bien que cette constatation soit de date déjà ancienne, et que le wolfram, tungstate de fer et de manganèse, soit assez répandu dans la nature pour donner lieu à des applications industrielles, l'usage de l'acier au tungstène s'est peu propagé, et l'on n'a jamais fait sur lui des expériences comme celles qui nous ont permis d'étudier d'une manière si complète les alliages de fer et de manganèse. Il en est de même à plus forte raison des autres métaux de ce groupe, l'étain, l'antimoine, le molybdène, le titane, qui tous peuvent théoriquement entrer dans la constitution des aciers, comme nous l'avons vu au chapitre 1^{er}, et dont, en fait, les fontes et aciers de l'industrie contiennent souvent des traces, mais assez faibles pour qu'on puisse les négliger.

Influence du cuivre. — Parmi les métaux de la classe suivante, le cuivre seul

mérite de fixer notre attention quelques instants. Les meilleurs minérais de fer, tels que les fers spathiques et magnétiques, renferment très fréquemment des plaquettes de pyrite de cuivre et de malachite, tellement disséminées dans le minéral que leur enlèvement est impossible. Il est donc bien rare qu'une analyse complète de fonte provenant de minéraux en roche n'indique pas la présence d'au moins quelques dix-millièmes de cuivre; or ce métal n'est pas de ceux que le traitement au haut fourneau et les affinages qui suivent puissent éliminer, car il est moins oxydable que le fer et on le retrouve tout entier dans l'acier, qu'il rend rouverin, pour peu qu'il s'y trouve en proportion notable. Comme cette même quantité n'est point suffisante pour influencer à froid la qualité des produits, le cuivre à l'inverse du phosphore est plutôt l'ennemi du fabricant que du consommateur, car ce dernier peut être assuré que si les aciers cuivreux dont il dispose ont pu se laminer, ils résisteront certainement aux efforts divers que leur emploi aura à leur imposer. Aucune expérience de traction et flexion n'a du reste été faite jusqu'à présent sur des aciers de cette nature.

Influence des métaux précieux. — Les minéraux de fer ne renferment jamais de métaux précieux, et il est peu probable que l'on soit jamais conduit à les associer au fer pour obtenir des alliages utilisables dans l'industrie. M. Fremy a du reste montré que ces alliages sont très difficiles à obtenir.

« Lorsqu'on chauffe l'alliage d'acier et d'argent, et qu'on le maintient pendant quelque temps à l'état de fusion, il paraît être parfaitement homogène et compact, mais si on le laisse refroidir et se solidifier, l'argent semble suinter à travers la matière et apparaît en petits globules séparés; lorsque la chaude est lente et fait à une température peu élevée, au lieu de globules on obtient des filaments minces et allongés, comme ceux de l'argent capillaire qui se forme sur les minéraux argentifères de la zone torride. L'argent ne s'allie donc pas chimiquement avec l'acier ni avec le fer, du moins 1 partie d'argent avec 160, 500 et 400 parties d'acier. Il a fallu 500 parties d'acier contre 1 d'argent pour que le métal fût homogène. Cet alliage a une très belle apparence, il est d'une telle dureté qu'il dépasse à cet égard le meilleur acier fondu, même le Wootz (1); il ne se gerce ni à la trempe ni sous le marteau, et produit à la forge des instruments d'une qualité parfaite et d'un usage excellent. »

M. Fremy a également montré que l'acier peut donner avec le platine un alliage ayant moins de dureté que l'acier argenté, mais plus de tenacité. Les deux métaux paraissent s'unir en toutes proportions. On fait d'excellents miroirs avec des parties égales d'acier et de platine. Ils reçoivent un beau poli et ne se ternissent pas. Pour les aciers tranchants l'alliage qui paraît le plus convenable contient de 1 à 5 pour 100 de platine. Le rhodium peut également s'allier à l'acier dans les mêmes proportions et donner un métal dont les propriétés sont les mêmes que celles de l'acier au tungstène.

Influence des métaux alcalins, alcalino-terreux et terreux. — On désigne,

1. On donne le nom d'acier Wootz ou acier indien à une variété d'acier qui se recouvre d'une espèce de moiré lorsqu'on le traite par des acides étendus. Il prend par la trempe une dureté remarquable.

comme on sait, sous ce nom tous les métaux qui, formant avec l'oxygène des bases très énergiques, se rencontrent rarement isolés, mais entrent pour une énorme proportion dans la composition de l'écorce terrestre. Les schistes, les argiles, les calcaires, dans les formations sédimentaires, les serpentines, les basaltes, le feldspath, dans les roches éruptives, en sont formés, et comme les minerais de fer, qu'ils soient en couches, en filons ou en amas irréguliers, sont nécessairement extraits à l'état de mélange avec ces gangues, on les retrouve dans le haut fourneau ; elles passent, il est vrai, dans les laitiers pour la plus grande partie, mais les métaux qu'elles recèlent peuvent aussi en faible proportion suivre, après réduction, le silicium dans les fontes. L'analyse des fontes siliceuses de l'usine de Montluçon, dont nous avons parlé au chapitre précédent, montrait la présence du calcium, de l'aluminium, du magnésium. Grüner, dans sa brochure de 1867, indique dans diverses fontes des teneurs en calcium de 0,05 à 0,091, en magnésium de 0,02 à 0,045, en aluminium de 0,068 à 0,077 ; les cendres du coke contribuent aussi à cet apport de métaux terreux. Lorsque les hauts fourneaux sont alimentés au charbon de bois, les cendres de ce combustible étant surtout alcalines, c'est le potassium et le sodium qu'on rencontre dans les fontes de plusieurs dix-millièmes.

On a vu que dans l'affinage, ayant pour but la transformation de la fonte en acier, le silicium s'oxyde facilement et doit exister dans la fonte à la dose de plusieurs centièmes pour se retrouver en quantités nuisibles, dosables dans l'acier. La plupart de ces derniers métaux étant au moins aussi oxydables que le silicium, doivent suivre la même loi que lui, et comme leur proportion dans la fonte dépasse rarement 1 pour 100, on conçoit qu'ils ne peuvent exister dans les aciers qu'à l'état de traces vraiment négligeables, et le métallurgiste, du moins jusqu'à cette heure, n'a pas cru devoir s'en occuper.

CHAPITRE V

INFLUENCE DE LA CHALEUR ET DU MAGNÉTISME SUR LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DES ACIERS

Chaudage d'une barre d'acier et phénomènes qui l'accompagnent. — Fusion ; aspect et caractères des aciers fondus. — Solidification ; structure et densité des aciers solidifiés. — Trempe et recuit. — Actions magnétiques.

Si la composition chimique des aciers exerce une influence considérable sur la résistance qu'ils peuvent opposer aux divers efforts auxquels ils sont soumis, elle ne produit que des variations peu sensibles dans leur aspect extérieur : on peut dire d'une manière générale que la cassure d'une barre d'acier dur se présente avec des grains plus fins, plus ternes que pour un acier plus affiné ; mais il est bien difficile, pour ne pas dire impossible, en voyant cette cassure, d'indiquer si la dureté a été obtenue au moyen du manganèse ou du carbone.

Ce rapport entre la texture et la dureté, sensible surtout dans les aciers bruts, c'est-à-dire dans des lingots rompus sans avoir été soumis à une action mécanique, devient de moins en moins saisissable pour des aciers laminés ou martelés ; bien plus, un acier n'ayant qu'une faible teneur en carbone, manganèse, silicium, etc., en un mot en éléments durcissants, pourra, après les opérations de compression qu'on désigne sous le nom général de corroyage, se présenter avec un grain bien plus serré qu'un acier plus chargé de ces éléments, et qui n'aura pas été travaillé. Il faut une pratique et des connaissances spéciales pour tenir compte de ces diverses conditions.

Les recherches microscopiques auxquelles se sont livrés MM. Osmond et Werth pour établir la théorie résumée à la fin du premier chapitre, leur ont d'ailleurs montré que la cassure d'un acier trempé qui semblait à l'œil nu amorphe et presque vitreuse, prend sous un grossissement convenable l'aspect que présentait à l'œil nu la cassure du même acier recuit. Ils ont même constaté que, sous un grossissement assez fort (100 diamètres au moins), on n'aperçoit plus aucune différence entre les aciers durs ou doux, recuits ou trempés, et cela, quelle que soit l'association chimique intervenue dans la composition de tous ces aciers.

La chaleur au contraire produit sur l'acier, comme du reste sur le plus grand nombre des métaux, une série de phénomènes sensibles pour l'œil le moins exercé. Si la dilatation causée par elle ne tombe pas facilement sous nos sens, et exige

aussi des appareils spéciaux pour être bien nettement constatée, il n'en est pas de même des changements de couleur que prend au four un lingot d'acier avant d'être porté au laminoir, et surtout du fait si considérable qui constitue le passage de l'état solide à l'état liquide par la fusion. Nous devons d'ailleurs nous féliciter de voir ces divers changements d'état se caractériser d'une manière si facile à saisir, car ils interviennent d'une manière constante dans les opérations métallurgiques et permettent au contremaître, à l'ouvrier, de s'initier à leur pratique sans posséder la préparation que des constatations plus scientifiques rendraient nécessaire.

Dilatation. — On sait que la chaleur appliquée à un corps quelconque se divise en deux parts : l'une qui se maintient à l'état sensible et échauffe le corps, l'autre qui disparaît comme chaleur et se transforme en travail mécanique, ayant pour effet l'augmentation de volume ou la dilatation du corps. On distingue dans les solides deux sortes de dilatation : la dilatation linéaire suivant une seule dimension, et la dilatation cubique ou en volume. Ces deux dilatations ont toujours lieu simultanément. On nomme coefficient de dilatation linéaire l'allongement qui correspond pour l'unité de longueur à une élévation de température d'un degré, et l'on peut admettre dans la pratique que le coefficient de dilatation cubique d'un corps est sensiblement le triple de son coefficient de dilatation linéaire.

On admet pour l'acier entre 0 et 100°, comme coefficient de dilatation linéaire, le chiffre de 0,00001080, et de 0,00005740 pour la dilatation cubique ; ces coefficients sont un peu moins élevés que ceux du fer, dont ils ne diffèrent qu'à la sixième décimale.

La connaissance des coefficients de dilatation offre spécialement pour l'acier, qui est employé en barres de grande longueur, une certaine importance. Dans la construction des chemins de fer, il est indispensable de laisser à la jonction des rails un intervalle suffisant pour le jeu de leur dilatation. Si les rails se touchaient, la force de cette dilatation les courberait de distance en distance, ou briserait les clous ou les vis qui fixent aux traverses soit le rail lui-même, soit son coussinet, là où l'on en fait encore usage. On a calculé en effet que pour une file de rails de 100 kilomètres l'allongement de l'hiver à l'été varie sous nos climats de 70 mètres. Il faut également tenir compte de la dilatation dans la construction des ponts et des grandes charpentes métalliques pour laquelle les aciers doux sont de plus en plus recherchés.

Dans l'emploi des aciers, l'ingénieur devra faire la part non seulement de la chaleur, mais aussi du froid qui, toutes choses égales d'ailleurs, les rend cassants. C'est ainsi que dans les pays dont le climat est rude, comme la Russie, on emploie pour la fabrication des rails des aciers plus doux que sous des climats plus tempérés. Certaines compagnies de chemin de fer tiennent compte de cette influence dans les épreuves au choc auxquelles les rails sont soumis avant leur réception définitive, et font varier suivant la température la hauteur de laquelle doit tomber le mouton sur le rail sans le briser.

Chaudrage de l'acier. — On a vu qu'une partie de la chaleur appliquée à tout corps solide provoque, outre la dilatation, un échauffement qui se manifeste par l'élévation de température ; cet échauffement est accompagné de phénomènes lumi-

neux, et de changements de couleur qui, pour l'acier, se produisent aux températures suivantes :

Rouge naissant.	515°
Rouge sombre.	700
Cerise naissant.	800
Cerise complet.	900
Cerise clair.	1000
Orange foncé.	1100
Orange clair.	1200
Blanc soudant.	1300
Blanc éclatant.	1400
Blanc éblouissant.	1600

Au delà de cette température, l'acier commence, nous l'avons dit à propos de l'action du carbone, à entrer en fusion. Ce changement d'état se manifeste d'autant plus vite que l'acier est plus chargé de corps étrangers, mais la diversité de ces corps ne modifie pas d'une manière sensible l'échelle des couleurs que nous venons d'indiquer.

Dans les appareils au moyen desquels ces diverses températures sont obtenues, les lingots ou barres d'acier sont presque toujours en contact direct avec la flamme, et celle-ci étant généralement oxydante, ces variations de couleur sont accompagnées de la formation d'un oxyde qui reste adhérent à la surface des pièces et diminue leur intensité lumineuse. Le plus souvent cette couche d'oxyde se détache dans les premières opérations mécaniques auxquelles est soumis l'acier, qui conserve en dessous toute sa qualité ; si toutefois la température s'élève trop, sans même atteindre le point de fusion, ou bien si l'action fortement oxydante se prolonge trop longtemps, le métal devient rouverin, non plus par suite de sa composition chimique, mais parce qu'il a été, suivant l'expression usuelle, brûlé au four. Voici donc, comme il arrive souvent, deux causes de nature très différentes qui peuvent produire séparément le même résultat, et quelquefois y concourir simultanément ; l'on conçoit les difficultés qui peuvent en résulter dans la marche d'une aciéries, où la fabrication des aciers bruts et leur élaboration postérieure sont confiées à deux chefs de service différents, soucieux tous deux de leur responsabilité. « L'acier que vous m'avez envoyé, dit l'un, est mauvais et a donné des rebuts au laminage. » — « Non, répond l'autre, l'acier est de bonne qualité, mais vos chauffeurs n'ont pas su s'en servir ; il a été brûlé et c'est à cela que tient l'insuccès. » C'est au directeur qu'il appartient de trancher de semblables différends, en examinant la question sous toutes ses faces, et en s'inspirant des considérations théoriques que nous nous efforçons de rassembler ici.

Fusion. — Toutes les fois que l'on chauffe un corps solide, il se dilate ; or il est facile de concevoir qu'il y a pour cette dilatation une limite au delà de laquelle l'attraction moléculaire devient impuissante à maintenir le corps dans son état présent ; les molécules se trouvent alors dans un état d'équilibre instable les unes par rapport aux autres, et se déplacent sous le moindre effort ; l'opération qui a pour effet de les amener à cet état se nomme la fusion.

Le phénomène de la fusion est constamment soumis aux deux lois suivantes :

- 1^o La température à laquelle s'opère la fusion est invariable pour chaque corps.
- 2^o La température d'un corps qui fond reste invariable pendant toute la durée de la fusion.

La conséquence de ces lois, c'est que la chaleur cédée au corps par le foyer, quelle qu'en soit l'activité, est tout entière employée à en opérer le changement d'état. Or ce changement ne peut s'opérer qu'en vertu d'un travail mécanique considérable, ce qui explique la disparition de la chaleur émise par le foyer. Le point spécial de fusion de l'acier étant, comme on l'a vu, très élevé, car il ne le cède guère à cet égard qu'au platine et aux métaux qui l'accompagnent, on peut concevoir dès à présent que la fusion de l'acier est une des opérations métallurgiques exigeant la plus grande dépense de combustible. C'est ainsi que dans la fabrication de l'acier au creuset, on n'arrive à en liquéfier le contenu qu'en entourant entièrement le creuset de coke, c'est-à-dire du combustible ayant le pouvoir calorifique le plus élevé, et en entretenant un tirage très énergique, destiné à activer la combustion quand on n'emploie pas les fours Siemens. Aussi le prix de revient de l'acier fondu était-il resté très élevé jusqu'au moment où deux inventions vraiment géniales, celle de Bessemer d'une part et de Siemens de l'autre, sont venues permettre de le produire économiquement en grandes masses.

Quel que soit son mode de production, l'acier fondu se présente sous la forme d'un liquide d'une fluidité parfaite et d'une blancheur éclatante. Calme et tranquille lorsqu'il s'écoule d'un creuset en renfermant 20 ou 30 kilogrammes à peine, il montre, lorsqu'on le coule à gros jet dans des lingotières pour en former des blocs de plusieurs centaines et souvent même de plusieurs milliers de kilogrammes, de singuliers phénomènes de flux et de reflux. Tantôt il se tasse rapidement en laissant sur les parois intérieures de la lingotière une sorte de gainc mince, tantôt il s'élève comme une sorte de mousse brûlante, et déborde de son récipient. Ces faits se produisent avec d'autant plus d'intensité que l'acier est plus doux, mais ils dépendent aussi d'autres circonstances qui seront analysées dans les chapitres spécialement consacrés à la fabrication.

Solidification et structure des aciers solidifiés. — Lorsque la source de chaleur extérieure qui avait provoqué la fusion vient à disparaître, les corps fondus reviennent à leur état naturel par un phénomène inverse nommé solidification. La température à laquelle il s'accomplit est précisément égale à celle de la fusion, et le liquide, en se solidifiant, dégage et transmet aux corps environnants toute la chaleur qu'il avait absorbée pendant sa fusion ; de plus, il reste à la même température jusqu'à ce qu'il se soit complètement solidifié. Le moment où pour l'acier la solidification est terminée, dépend évidemment de la plus ou moins grande conductibilité des récipients dans lesquels il a été coulé, et des dispositions prises pour hâter le refroidissement de ces récipients. Lorsque l'acier est coulé en blocs de 400 à 500 kilogr. dans des lingotières en fonte, ayant une épaisseur de paroi de 6 à 8 centimètres, la solidification est opérée au bout de quelques minutes, et l'on peut commencer le démoulage alors que les lingots ont encore la couleur rouge cerise. Si la coulée a été faite dans des moules en terre réfractaire, beaucoup moins bonne conductrice, la solidification et le démoulage durent nécessairement plus longtemps.

Quoi qu'il en soit, si l'on examine un lingot d'acier fondu coulé en lingotière, comme c'est le cas pour les pièces de forme simple, on constate facilement son manque d'homogénéité. Ce défaut étant très atténué, pour toutes les pièces soumises au laminage et au forgeage, par les élaborations ultérieures, on l'avait peu analysé jusqu'au moment où M. Tchernoff, métallurgiste russe, est venu élucider la question par des travaux dont la traduction a été publiée en 1877 et 1880, dans le *Bulletin de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne* et dans la *Revue universelle de Liège*. Les observations de M. Tchernoff et des expérimentateurs qui l'ont suivi dans cette voie nouvelle peuvent se résumer ainsi :

L'examen d'une section de lingot d'acier peut présenter deux aspects distincts.

Dans le premier cas on constate :

1^o Des soufflures ou bulles réparties assez régulièrement dans les parties du lingot voisines de la lingotière;

2^o Une cavité plus ou moins régulière à la partie supérieure du lingot et portant le nom d'entonnoir de retassement;

3^o Une zone entourant l'entonnoir, composée de métal plus ou moins spongieux, et devenant de plus en plus compact à mesure qu'on s'éloigne davantage du centre du lingot, jusqu'à ce qu'on arrive aux bulles situées au contact de la lingotière. La partie moyenne seule du lingot présente une structure réellement compacte, plus ou moins cristalline, et possédant la densité normale de l'acier.

Dans le second cas, la coupe du lingot présente :

1^o A la surface une zone, composée d'aiguilles cristallines, ayant leur grand axe de cristallisation dirigé perpendiculairement à la surface refroidissante;

2^o Une couche dite à granulations, présentant des formes polyédriques irrégulières;

3^o Une zone médiane, à cassure brillante et compacte;

4^o La zone de métal spongieux et enfin l'entonnoir de refroidissement.

MM. Osmond et Werth devaient nécessairement être conduits par leurs études à reprendre les travaux de Tchernoff et à les compléter par de nouvelles expériences. Prenant un petit lingot de 80×80 mm, dont la forme primitive est représentée sur la figure ci-dessous par A, B, C, D, ils l'ont sectionné suivant α , β en travers et γ en long. La partie supérieure AB $\alpha\beta$ a été forgée en carré de 40×40 , et le bout de ce carré correspondant à la face $\alpha\beta$ coupé en cinq morceaux cubiques b, c, d, e, f. L'échantillon b a été forgé et refroidi naturellement; l'échantillon c forgé et recuit, l'échantillon d trempé, l'échantillon e trempé et recuit, enfin l'échantillon f écroui.

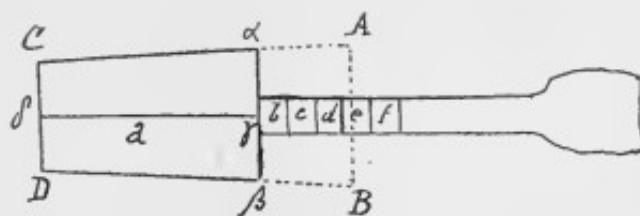


Fig. 1.

Nous résumerons les indications ainsi obtenues lorsque nous traiterons de ces

diverses opérations et nous nous en tiendrons actuellement aux constatations faites sur le lingot brut.

« Les sections $\alpha\beta$, $\gamma\delta$, polies et attaquées par l'acide azotique, offrent, sur fond sombre, un réseau visible à l'œil nu de lignes blanches brillantes, formant des polygones ayant une tendance très marquée à s'allonger normalement aux faces dans les régions périphériques ; puis ils prennent des dimensions et des formes plus régulières, enfin vers le centre ils perdent toute netteté et s'enchevêtrent les uns dans les autres. »

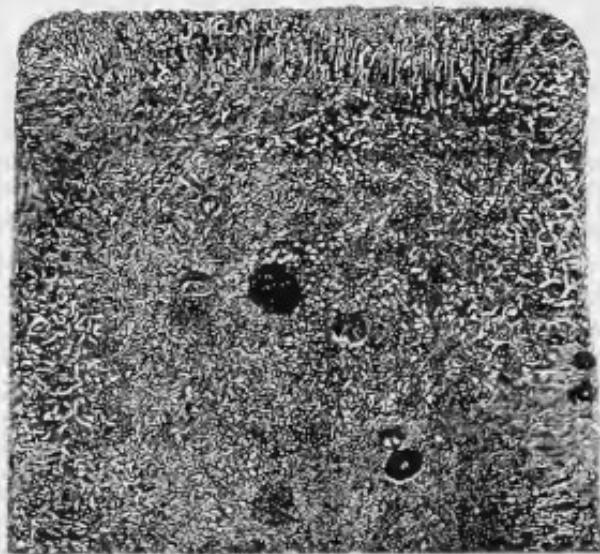


Fig. 2.



Fig. 3.

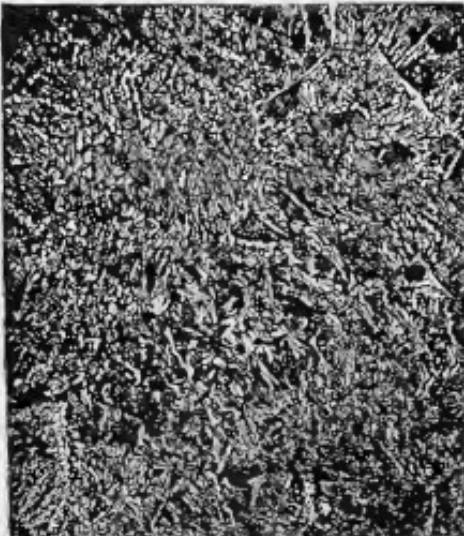


Fig. 4.

La figure 2, qui reproduit la section $\alpha\beta$, pied du lingot, correspond entièrement

aux indications de Tchernoff pour le second aspect des lingots sectionnés. Cette concordance est également établie par les deux figures suivantes, qui montrent avec un grossissement de 18 diamètres la texture du lingot vers les bords et vers le centre. On y remarque, dans l'intérieur des polygones, un chevelu de trainées brillantes parallèles, formant dans une même région un ou plusieurs systèmes arrêtés par les lignes du réseau polygonal. Ces systèmes sont, d'après la nouvelle théorie, des cellules composées sans enveloppes, et ces surfaces de contact, reconnaissables à leur éclat, ne renferment pas de carbure de fer, puisque l'acide azotique les dissout sans résidu, lorsque le métal est attaqué en lames minces. Elles ne renferment donc aucun ciment, et MM. Osmond et Werth arrivent ainsi à la conclusion que ces surfaces de contact des cellules composées doivent être, au point de vue de la résistance aux efforts mécaniques, des surfaces de faiblesse, suivant lesquelles se produisent les érides et les ruptures des lingots. *Le réseau de moindre cohésion est donc aussi un réseau de carburation minima.* Nous ne croyons pas nécessaire de faire ressortir l'importance de cet énoncé, résultant d'expériences très complètes, et la théorie cellulaire pénètre ainsi dans le domaine des applications pratiques.

Les causes qui peuvent, dans la fabrication courante de l'acier fondu, modifier les formes et les dimensions des cellules composées sont nombreuses. Nous nous bornerons à indiquer dès à présent qu'elles dépendent du mode de fabrication et tout particulièrement des dispositions prises pour la coulée, opération particulièrement délicate et sur laquelle les divers mémoires et traités relatifs à la fabrication de l'acier n'ont pas jusqu'à présent, à notre avis, suffisamment insisté. C'est donc dans la seconde partie que nous aurons l'occasion de revenir sur les travaux de M. Tchernoff, ainsi que de MM. Osmond et Werth et d'en signaler les conséquences.

Densité. — Les différences de texture, si sensibles qu'elles soient, n'exercent pas sur la densité des aciers une influence aussi grande qu'on serait porté à le supposer. On constate d'une manière générale que les aciers doux sont plus denses que les aciers durs, ce qui s'explique facilement, puisque le carbone, dont le poids spécifique est environ trois fois moindre que celui du fer, se rencontre dans les aciers durs jusqu'à la teneur de 1,00 %, tandis que les aciers les plus doux n'en contiennent plus que quelques dix-millièmes; la densité des premiers a été trouvée à Reschitza être de 7,858 et même de 7,867, tandis que celle des seconds descend à 7,816. Ce sont là les écarts extrêmes pour les aciers Bessemer et Martin, mais la densité des autres variétés d'acier peut varier dans des limites plus larges, comme l'indique le tableau suivant, emprunté à la chimie générale de MM. Pelouze et Fremy :

Acier fondu (barre du commerce)	7,82
Le même trempé.	7,78
Le même recuit et refroidi lentement.	7,80
Acier naturel.	7,50
Acier Wootz cru.	7,58
Le même forgé	7,64
Le même après fusion.	7,20

Trempe. — Bien que le phénomène connu sous le nom de trempe, et auquel non seulement l'acier, mais un grand nombre de corps simples ou composés peuvent être soumis, soit causé par un refroidissement brusque, il ne doit pas moins être mis au rang des modifications de l'acier produites par la chaleur. En effet, avant de refroidir un corps, il faut l'échauffer, et même, sans chauffage préalable, le refroidissement n'est pas autre chose qu'une action calorifique négative. Cette étude est donc bien à sa place ici.

Nous empruntons la définition de la trempe et de ses propriétés essentielles aux travaux que M. Fremy ne pouvait manquer de consacrer à cette question, lors de son étude générale sur les aciers.

« L'acier, dit-il, que l'on porte à une température rouge et que l'on refroidit subitement, éprouve le phénomène de la trempe ; il devient excessivement dur, très cassant et peut même rayer le verre. La dureté d'une trempe dépend de la température à laquelle l'acier a été porté, et de la nature du corps qu'on emploie pour le refroidir. Le degré convenable de chaleur pour la trempe de l'acier est le rouge-cerise. Pour produire une trempe très dure, il faut porter l'acier au rouge blanc et le plonger dans de l'eau très froide, ou mieux dans du mercure. Les trempes douces s'obtiennent en refroidissant l'acier dans des corps gras ou dans de la résine en fusion, et quelquefois dans un courant d'air. »

« L'effet de la trempe sur le métal est de rapprocher brusquement les molécules les unes des autres par un mouvement tellement rapide, qu'il ressemble dans ses effets physiques au choc d'un marteau agissant en même temps dans tous les sens. C'est ce choc qui produit la combinaison entre le fer et le carbone. »

L'hypothèse de la combinaison du fer avec le carbone produite par un choc, s'appuie sur une série d'expériences de date déjà ancienne, dues à M. Caron, dont la description est reproduite dans plusieurs ouvrages. Nous croyons néanmoins devoir les résumer ici :

M. Caron a reconnu que le résidu, formé surtout de graphite, abandonné par l'acier cémenté lorsqu'on le dissout dans les acides, se réduit, comme l'avait constaté Karsten, à une petite quantité de silice lorsqu'on opère sur le même acier trempé, et diminue déjà sensiblement lorsque cet acier a été martelé. C'est ce qui résulte des chiffres suivants :

	Résidu pour 100 gr. dissois.		
Acier de cémentation ordinaire	4 ⁸⁷ ,624	(1)	
— martelé	4 ,245	(2)	
— trempe	0 ,240	(5)	

Ces résidus analysés contiennent : (1) (2) (5)

Carbone	0,825	0,560	traces.
Fer	0,557	0,445	traces.
Silice	0,242	0,258	0,240

Ainsi l'effet produit d'une manière complète par la trempe, se trouve réalisé partiellement par le martelage, auquel il est naturel d'assimiler l'action de resserrement produit par la brusque contraction de la surface extérieure.

D'autre part, en mesurant les dimensions d'une barre d'acier avant la trempe,

au rouge, et après la trempe, M. Caron a trouvé, pour le volume initial, 20,000, au rouge, 21,557, et après la trempe, 20,551. L'effet de la trempe a donc été de rapprocher brusquement les molécules, en produisant une action tout à fait semblable à un martelage. En répétant un grand nombre de fois ces expériences, et en faisant varier les liquides servant à tremper l'acier, M. Caron a reconnu que la dureté, l'aigreur, ainsi que les autres effets produits par la trempe, sont inversément proportionnels au carré de la durée du refroidissement du métal durci, durée qui dépend de la température, de la densité, de la chaleur spécifique, de la conductibilité, et peut-être de la fluidité du liquide employé à la trempe.

Depuis lors, bien des études ont été faites, aussi bien au point de vue théorique qu'au point de vue pratique, sur cette précieuse propriété. Parmi les plus récentes et les plus complètes, il convient de citer celles de M. R. Akermann, publiées dans la *Revue universelle de Liège*, en 1880 sous le titre de *Notes sur la trempe du fer et de l'acier*; sans apporter aucun élément contradictoire aux théories admises jusqu'alors, le savant professeur a surtout examiné l'influence que les divers corps intervenant dans la composition de l'acier peuvent exercer sur l'intensité plus ou moins grande de la trempe, et sur le rôle que celle-ci joue à son tour dans la résistance et l'élasticité de ces composés. C'est ainsi qu'il constate de grandes analogies entre l'influence de la trempe et l'augmentation de la teneur en carbone; dans les deux cas, l'allongement diminue et la finesse et la dureté du grain augmentent; il a également reconnu que les deux effets se superposent, et que des aciers fortement carburés deviennent cassants, même avec une trempe assez légère.

L'action de la trempe est d'autant plus énergique, que l'acier contient plus de corps alliés au fer. C'est ainsi que les aciers manganésés fortement trempés, deviennent tellement durs, qu'ils peuvent s'égrener sous le marteau; ils présentent alors une structure saccharoïde brillante, extrêmement curieuse, structure que l'on peut faire varier par degrés insensibles dans une même barre d'acier, depuis le gros grain rond et brillant jusqu'au grain fin, serré et gris terne, correspondant au maximum de résistance, en faisant la trempe à des températures décroissantes, depuis le blanc éblouissant jusqu'au rouge-cerise sombre.

Les aciers chromés prennent par la trempe, à température convenable, un grain tellement fin, que, pour de fortes teneurs en chrome et en carbone, la cassure est pour ainsi dire vitreuse. Ils deviennent fragiles lorsque la proportion de chrome est trop considérable.

M. Akermann a particulièrement étudié l'effet de la trempe sur les aciers phosphoreux. Tout en durcissant dans une certaine proportion par la trempe, ils conservent encore un allongement assez considérable, ce qui a fait dire que le phosphore empêchait la trempe. Les aciers phosphoreux, il est vrai, semblent moins susceptibles de se tremper, par ce seul fait qu'ils sont en général, pour ne pas dire toujours, moins carburés que les aciers ordinaires, car on évite d'y introduire plus de 0,50 pour 100 de carbone. Ce qu'on peut dire sans s'écartez de la vérité, c'est que de deux aciers, dont l'un contient 1 pour 100 de carbone avec des traces de phosphore et dont l'autre renferme 0,50 de carbone et 0,60 de phosphore, le premier, toutes choses égales d'ailleurs, prendra une trempe plus énergique que le second.

L'influence du silicium sur les propriétés mécaniques des aciers se rapprochant de celle du carbone, on est porté à en conclure que ces deux métalloïdes se com-

portent, lors de la trempe, d'une manière analogue ; cependant M. Considère signale dans son mémoire l'opinion généralement admise que le silicium diminue l'aptitude de l'acier à prendre la trempe. Peut-être bien y a-t-il ici un malentendu analogue à celui que nous avons reconnu exister à propos du phosphore.

Le phénomène de la trempe devait nécessairement être envisagé dans la nouvelle théorie cellulaire des aciers. Les conclusions auxquelles MM. Osmond et Werth sont arrivés, diffèrent sensiblement des idées actuelles ; d'après eux, il faudrait distinguer dans les fers carburés, deux variétés de carbone ; la première, qu'ils désignent sous le nom de carbone de recuit, parce qu'elle domine dans l'acier recuit où elle constitue le ciment ; la deuxième, qu'ils désignent sous le nom de carbone de trempe, ne serait pas combinée au fer et domineraient à l'état de dissolution dans les régions périphériques des aciers trempés. Toutefois l'écrouissage, dont nous examinerons les propriétés générales au chapitre suivant, pouvant réaliser, bien qu'à un moindre degré, les effets de la trempe, et cela sans aucune intervention de carbone, MM. Osmond et Werth ont été conduits à réunir dans une même cause les phénomènes de trempe et d'écrouissage et à les attribuer non seulement aux transformations du carbone, mais encore à l'existence de deux variétés allotropiques du fer, dont l'une domine dans l'acier recuit, tandis que l'autre se trouve mélangée dans les aciers trempés ou écrouis en proportions variables, suivant l'intensité des causes qui l'y ont formée. Nous ne saurions entrer ici dans le détail des expériences calorimétriques sur lesquelles s'appuie cette manière de voir, déjà entrevue par M. Jullien dans sa *Théorie de la trempe*, publiée en 1862 et à laquelle MM. Osmond et Werth donnent aujourd'hui un regain d'actualité.

Quelle que soit la cause intime de la trempe, et à cet égard MM. Osmond et Werth reconnaissent eux-mêmes qu'ils ont dû laisser des points obscurs, et faire appel à plusieurs hypothèses sur lesquelles la discussion reste ouverte, les expériences qu'ils ont faites ont eu le grand avantage de nous en bien montrer les effets. On se souvient des cubes de 0^m,040 de côté, découpés dans un petit lingot, en vue d'étudier au microscope leur structure, après diverses élaborations. Les figures 5 et 6 montrent les aspects de l'acier forgé et de l'acier trempé, tels qu'ils se présentent après l'attaque de l'acide azotique, sous un grossissement de 68 diamètres.

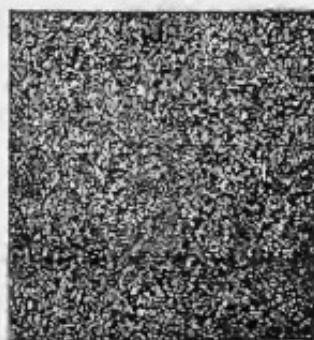


Fig. 5.

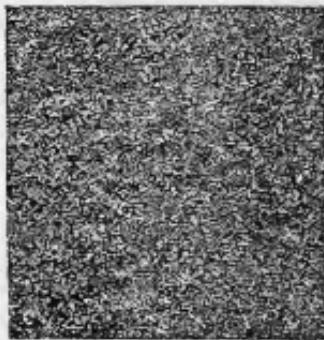


Fig. 6.

La figure 5 montre un réseau polygonal comparable à celui de l'acier brut

(voir les figures de la page 41), mais les cellules composées sont devenues beaucoup plus petites et beaucoup plus uniformes; leurs limites sont aussi moins nettes, et les cellules voisines présentent de très fréquentes liaisons; les lignes métalliques brillantes qui les séparent sont le plus souvent discontinues.

Après la trempe vive (fig. 6), le cube a pris, au contact de l'acide azotique, une coloration uniforme d'un noir intense, qui montre bien la répartition continue du carbone à un état particulier; la surface immergée est comme recouverte d'une mince couche de noir de fumée. Après un lavage qui a fait disparaître cette pellicule, l'acier trempé présente alors un aspect général plus sombre que celui des autres échantillons; les cellules composées ont disparu; cependant la surface est encore divisée par un réseau de sillons peu profonds, ternes, irrégulièrement enchevêtrés à la manière des vermiculures; les grains à facettes brillantes deviennent rares; l'éclat est légèrement vitreux; on remarque parfois de minces fissures à bords brillants, produites par une trempe trop brutale; des taches noires révèlent probablement des points plus carburés.

Recuit. — Telles sont les dernières recherches théoriques auxquelles la trempe des aciers a donné lieu; on examinera dans la seconde partie de l'ouvrage les conditions auxquelles elle doit satisfaire, lorsqu'on l'envisage comme procédé de fabrication industrielle, et nous passerons maintenant à l'étude générale de l'opération qui la suit ordinairement sous le nom de *recuit*. Le recuit est, comme son nom l'indique, un réchauffage auquel on soumet l'acier pour atténuer les effets de la trempe, et l'amener bien exactement au degré de dureté qu'on désire lui voir garder. Poussé à l'extrême, il a pour résultat de détruire entièrement l'effet de la trempe. C'est donc une opération délicate et qui, lorsqu'il succède à la trempe proprement dite, exige d'assez grandes précautions.

On a vu que le martelage produit des effets analogues à la trempe, et on pourrait en dire autant du laminage, surtout lorsqu'il est fait à basse température. Il importe, pour les pièces devant résister à des efforts de traction ou de flexion, de faire disparaître cette trempe accidentelle, qui résulte de leur mode d'élaboration, mais n'est en aucune façon réclamée par la destination de la pièce elle-même. Le recuit permet d'y arriver sûrement; aussi son emploi s'est-il beaucoup répandu dans les usines depuis quelques années pour les essieux, les tôles et les divers aciers profilés sur la douceur desquels on veut pouvoir compter.

L'influence du recuit est particulièrement sensible sur les aciers coulés, dans lesquels les cellules composées présentent leurs plus grandes dimensions, et dont les grandes lignes de rupture sont particulièrement accusées. Ils présentent néanmoins en cet état une résistance qui, bien qu'inférieure à celle de l'acier laminé ou forgé, est au moins double de celle de la fonte. Leur allongement est aussi nécessairement irrégulier et varie d'un point à un autre d'une même pièce, mais il est toujours supérieur à celui de la fonte. C'est ainsi qu'on peut obtenir 40 kilogrammes de résistance à la rupture, avec 5 à 6 pour 100 d'allongement permanent, d'acières bruts coulés de bonne qualité.

L'influence du recuit sur le cube d'acier forgé de la figure 5 est montrée par la figure 7; comme on le voit, les effets du forgeage se sont encore accentués et les cellules composées sont devenues de plus en plus petites et confuses.

Le recuit même sans forgeage rend donc moins cristalline la structure de l'acier

coulé et augmente son allongement. Par exception à la règle habituelle il augmente aussi sa résistance. On peut compter, pour les aciers de dureté moyenne coulés en lingots et recuits, sur 45 à 50 kilogrammes de résistance moyenne de traction et sur 7 à 8 pour 100 d'allongement. Ces aciers ont donc un avantage considérable sur la fonte, dont la résistance est en général de 10 à 20 kilogrammes avec un allongement insignifiant.

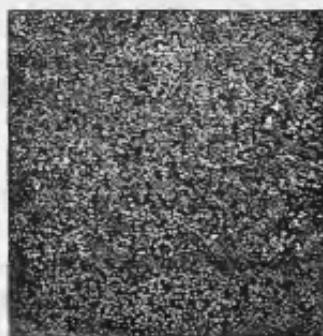


Fig. 7.

La trempe suivie d'un recuit améliore énormément l'acier moulé et lui donne des qualités très voisines de celles du fer forgé et laminé : on constate que la structure du métal change en même temps que ses propriétés mécaniques. On peut ainsi obtenir des aciers moulés donnant 45 kilogrammes avec 15 pour 100 d'allongement, ou 60 kilogrammes avec 10 pour 100 d'allongement. Ces faits sont très importants pour la fabrication des moussages sans souillures, qui fait des progrès rapides en ce moment.

Le recuit auquel sont soumis les lingots et les grosses pièces dont nous nous sommes occupés jusqu'à présent, et qui a pour but de modifier profondément leur texture, doit se faire à une température assez élevée. Il n'en est pas de même des recuits auxquels sont soumis les aciers extra-fins en barres minces, pour obtenir des variations de qualité à peine sensibles. Ces recuits se font à une température inférieure au rouge naissant, et l'ouvrier se guide dans le travail par la variation des teintes indiquées ci-dessous en regard de la température qui les accompagne.

Jaune pâle	216
Entre jaune pâle et jaune paille	228
Jaune paille	252
Brun	254
Tacheté de pourpre	265
Pourpre	277
Bleu clair	288
Bleu foncé	292
Bleu noir	516

Sans entrer dès à présent dans la nomenclature des outils si variés pour la fabrication desquels les aciers trempés et recuits sont employés, nous indiquerons que

le recuit au jaune pâle s'applique aux couteaux, aux rasoirs et en général aux outils purement tranchants, tandis qu'on recuit au bleu les ressorts; les scies, et en général les pièces qui doivent joindre à la dureté une certaine élasticité.

Soudure de l'acier. — On désigne sous le nom de *soudure* l'opération par laquelle on unit au moyen de la chaleur et souvent avec l'intervention d'un fondant spécial, le même métal ou deux métaux différents. Lorsque la soudure peut être opérée directement par la chaleur sans l'aide d'aucun fondant, elle est dite autogène; c'est le cas pour le fer et l'acier, mais pour l'obtenir il ne suffit pas de rapprocher les deux pièces à souder, il faut les soumettre à un travail mécanique, qui détermine l'adhérence définitive des molécules.

On a vu que la soudabilité de l'acier dépend de la teneur en carbone; lorsque ce métalloïde se rencontre à peu près seul dans des aciers très purs comme ceux obtenus par le procédé Bessemer à Neuberg en Styrie, une teneur de 1 pour 100 de carbone permet encore d'effectuer la soudure; cette indication, fournie lors de l'exposition de 1867, a été confirmée en 1878 par l'examen des échantillons d'acier soudés présentés par le Jernkontoret Suédois, et par les usines de Reschitz et d'Anina appartenant à la Société autrichienne des chemins de fer de l'État. Ces dernières avaient exposé des séries complètes d'aciers Bessemer, Martin et Pernot soudés à eux-mêmes et à du fer à nerf; on trouvait même dans cette remarquable collection des barres d'acier composées de 5 mises pour chacune desquelles la teneur en carbone répondait à un numéro différent de l'échelle de dureté, et dont la cassure laissait voir néanmoins une quintuple soudure absolument irréprochable. Les excellents résultats de ces essais avaient même conduit l'usine d'Anina à baser sur eux une fabrication spéciale, celle de rails à tête d'acier permettant d'utiliser de vieux rails en fer pour le patin et l'âme du rail, tout en réservant à la tête les avantages incontestables d'un métal fondu.

L'influence des corps autres que le carbone sur la soudabilité des aciers n'a pas été spécialement étudiée. Nous savons d'une manière générale que les métaux se soudent bien, tandis que les métalloïdes possèdent peu cette propriété. Le manganèse, voisin du fer et de plus son épurateur, doit donc avoir dans le soudage une influence plutôt favorable; il rend les scories très fluides, et facilite par suite leur séparation du bain métallique; or ce sont le plus souvent les scories qui pour le fer comme pour l'acier, interposant entre les molécules métalliques une matière inerte, s'opposent à leur union. A cet égard le silicium doit avoir une action nuisible, et ce nouveau défaut vient s'ajouter à ceux que nous avons déjà eu l'occasion d'imputer aux aciers siliceux. Quant au phosphore, sa présence, loin de nuire à la soudabilité des aciers, paraît plutôt la faciliter. C'est là un fait intéressant et qui ressort de cette observation que les aciers de Reschitz, dont la bonne soudure a été établie, renferment de 0,05 à 0,08 de phosphore. Les aciers doux obtenus dans le nord de la France par la méthode de déphosphoration en renferment des quantités beaucoup moins, et sont en outre manganésés; ils doivent donc donner une soudure excellente; et comme les doutes qu'on émet à tort à cet égard s'opposent seuls à leur emploi dans la petite forge, à la place des fers puddlés qui leur sont bien inférieurs comme résistance et comme allongement, c'est là un point sur lequel nous tenons tout particulièrement à insister.

Propriétés magnétiques et électro-chimiques des aciers. — L'étude de la chaleur est ordinairement suivie dans les traités de physique de celle de l'électricité. C'est là ce qui nous conduit à placer à la fin de ce chapitre les résultats des expériences encore peu nombreuses faites en vue d'établir des relations entre la composition des aciers et leurs propriétés magnétiques et électro-chimiques. On sait depuis longtemps qu'il existe une différence sensible entre le fer doux et l'acier au point de vue de ces phénomènes. La force coercitive, c'est-à-dire la force qui s'oppose soit à la décomposition, soit à la reconstitution des fluides magnétiques, nulle dans le fer, existe dans l'acier trempé, où elle est d'autant plus énergique que la trempe est plus dure. MM. Durassier et Clèves se sont livrés à des expériences dans lesquelles ils ont opéré sur une série d'acières ayant une teneur en carbone variant de 0,25 à 0,95 pour 100, trempés en 5 séries, à l'huile, à l'eau et à l'eau bouillante, puis aimantés jusqu'à saturation par la méthode de double touche. La force coercitive a été mesurée par la méthode des déviations.

Le résultat de ces expériences est résumé dans le tableau suivant.

TENEUR EN CARBONE	RÉSISTANCE A LA RUPTURE	ANGLE DE DÉVIATION		
		TREMPE A L'EAU FROIDE	TREMPE A L'HEUILLE	TREMPE A L'EAU BOUILLANTE
0,950	95,50	47°,0	44°,0	43°,0
0,550	68,20	43°,0	57°,0	50°,0
0,500	64,40	42°,5	57°,0	50°,0
0,450	59,70	55°,5	29°,0	22°,0
0,250	41,50	13°,0	12°,0	10°,0

On voit que l'angle de déviation varie avec le degré de trempe, mais la variation est faible ; il varie aussi avec la teneur en carbone, et passe de 47° pour un acier renfermant 0,95 à 13° pour un acier à 0,25.

Des expériences sur le même sujet ont été faites récemment par M. Raoul Pietet de Genève : cet expérimentateur avait pour but l'étude comparative des différentes qualités de l'acier au point de vue de leur aimantation et de la permanence de leur pouvoir magnétique. Il a constaté que le pouvoir magnétique des aciers est en rapport avec leur teneur en carbone, mais qu'une trop forte proportion de ce métalloïde est nuisible, tandis qu'une trop faible proportion supprime ou affaiblit le magnétisme rémanent. Les applications déjà si nombreuses de l'électricité rendent de semblables études particulièrement intéressantes, et nous ne doutons pas qu'elles ne soient poursuivies avec la méthode à laquelle nous sommes dès à présent accoutumés.

CHAPITRE VI

INFLUENCE DES OPÉRATIONS AUXQUELLES LES ACIERS SONT SOUMIS DANS LEUR FABRICATION ET LEUR FINISSAGE SUR LEURS PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES

Écrouissage. — Compression. — Poinçonnage. — Cisaillage. — Expériences de M. Considère sur les conséquences de ces diverses opérations.

La chaîne est, nous l'avons vu dans le chapitre précédent, l'agent métallurgique par excellence; mais si elle rend les métaux, et parmi eux l'acier, aptes à recevoir les formes les plus diverses, elle ne leur donne pas cette forme; il faut pour l'obtenir le concours des marteaux avec tout leur attirail d'étampes, de mandrins et de matrices, les laminoirs avec leurs cannelures de profils si variés, ou bien des moules que le métal fluide vient remplir; les pièces façonnées, pour entrer dans la composition des machines et des édifices en s'agencant les unes avec les autres, doivent encore être entaillées, percées, rabotées, soumises le plus souvent à froid à l'action de nombreuses machines-outils. Cette dernière élaboration, désignée ordinairement sous le nom de finissage, n'est pas sans exercer sur les propriétés physiques et mécaniques des aciers une influence appréciable. C'est cette influence qu'il nous reste à examiner.

Écrouissage. — On doit considérer comme point de départ de ces études la constatation de ce fait que le martelage des aciers peut produire sur eux des effets analogues à ceux de la trempe. Ce n'est qu'un cas particulier d'un phénomène plus général connu sous le nom d'écrouissage, et dont nous empruntons la définition au mémoire de M. Considère.

« Lorsqu'un métal (fer ou acier) subit un travail de déformation quelconque à une température inférieure au rouge cerise, sa charge de rupture augmente en général, et sa limite d'élasticité augmente d'une quantité plus forte, de sorte que le rapport de ces deux quantités devient lui-même plus élevé. En même temps l'allongement que le métal est capable de supporter avant de se rompre diminue d'une quantité relativement plus grande que l'augmentation de la charge de rupture. Il en résulte une diminution du travail de déformation, que le métal peut supporter avant la rupture. C'est cette modification d'état qui a reçu le nom d'écrouissage. »

Ces faits ont été mis très nettement en évidence par les expériences de M. Considère; dont les résultats sont réunis dans le tableau suivant :

DÉSIGNATION DU MÉTAL	LIMITE D'ÉLASTICITÉ	RÉSISTANCE à la RUPTURE	RAPPORT de la LIMITE D'ÉLASTICITÉ à la RÉSISTANCE	ALLONGEMENT TOTAL
Aacier extra-doux essayé à l'état naturel	25.3	42.5	0.59	26.5
Le même comprimé à la presse hydraulique à la pression de 50 kg. par millimètre carré.	55.7	44.6	0.81	17.0
Aacier pour coques de navires essayé à l'état naturel	29.6	52.5	0.56	18.0
Le même réduit par laminage à froid de 10 mm à 9 mm, 45 d'épaisseur . . .	42.4	54.5	0.77	11.5
Tôle de fer à l'état naturel	22.8	37.4	0.61	15.0
La même, réduite par un laminage à froid de 8 mm à 7 mm, 10 d'épaisseur . . .	41.6	46.9	0.89	7.0

En poussant plus loin le laminage à froid, on aurait certainement accentué l'effet produit.

L'étrorage à la filière, employé pour la fabrication des fils de fer et d'acier, rentre au premier chef dans le travail d'écrouissage ; il peut doubler la résistance du métal, et on arrive à obtenir par des passages successifs des fils présentant la résistance énorme de 150 à 140 kilogrammes par millimètre carré ; dans ce cas l'allongement permanent avant rupture se trouve presque complètement annulé. C'est en combinant le travail à la filière avec le recuit qu'on obtient des fils d'acier répondant à toutes les exigences pratiques.

Les phénomènes d'écrouissage doivent, pour être bien compris, être rapprochés de ceux de la striction. Nous avons vu en effet, au chapitre II, que la résistance réelle de l'acier, rapportée à la section de rupture, est beaucoup plus élevée que la résistance rapportée à la section primitive, que l'on a l'habitude de considérer exclusivement.

Pour acquérir toute la puissance de résister dont elles sont capables, les molécules du métal paraissent avoir besoin de se déplacer et de prendre une nouvelle orientation. Lorsqu'elles la prennent sous l'action d'une traction simple, c'est au prix d'une diminution de section qui en masque l'effet ; mais il n'en est pas moins vrai que le métal prend ainsi une résistance considérable. L'écrouissage produit le même effet que la traction, mais à un degré moindre ou plus énergique suivant l'intensité ou la multiplicité des actions mécaniques dont il est le résultat ; ainsi dans l'étrorage à la filière, où le métal est comprimé latéralement en même temps qu'il est tiré longitudinalement, on obtient une résistance un peu plus forte encore que dans la striction.

Toutefois la différence n'est pas très grande et, si elle semble aussi considérable, c'est qu'en comparant les deux métaux, on a l'habitude de rapporter la résistance de l'un à la section primitive avant la diminution qu'a produite la striction, tandis qu'on rapporte la résistance de l'autre à la section que l'étirage a donnée et qui ne diminue plus sensiblement au moment de la rupture. L'étirage est en somme un moyen d'obtenir avant l'emploi, dans toutes les parties d'un fil métallique, les effets que la striction produirait en un de ses points et de les rendre plus énergiques encore par une compression latérale. Dans le laminage, la compression latérale se produit seule, et le métal est soutenu en sortant des cannelures, mais n'en est point tiré ; aussi le laminage produit-il des effets moins sensibles que l'étirage.

Aux phénomènes d'écrouissage se rattachent ceux qui résultent du poinçonnage et du cisailage et qui seront examinés plus loin ; mais nous devons étudier auparavant, en utilisant les intéressants travaux de M. Clémardot, toute une série de faits se rapportant à la compression à chaud des aciers.

Compression à chaud. — Les expériences de M. Clémardot lui ont été inspirées par la pensée que la trempe, obtenue, comme on sait, partiellement au moyen du martelage, pourrait être réalisée d'une manière complète par une compression à chaud, *prolongée* jusqu'au moment où les molécules ne pourraient plus se mouvoir. C'est en cela que ses intéressantes expériences diffèrent de celles faites en vue d'étudier l'écroutage, car il y introduit deux nouveaux facteurs, l'action de la chaleur et celle de la durée, qui dans le cas actuel exerce une influence considérable.

Pour obtenir le résultat recherché, M. Clémardot a donc fait une série d'expériences sur des aciers coulés en lingots, martelés ou laminés. Après les avoir réchauffés au rouge cerise, il les a soumis à l'action de la presse hydraulique poussée jusqu'à 1000, 2000 et même 5000 kilogrammes par centimètre carré. Les ayant alors laissés refroidir entre les plateaux de la presse, il a constaté des modifications caractérisées par une finesse de grain beaucoup plus grande, et par une dureté et une résistance à la rupture bien plus considérables, surtout lorsqu'il s'agissait d'aciers assez fortement carburés. Il a donc obtenu de cette manière une véritable trempe, avec tous les caractères que la trempe par immersion dans des bains appropriés produit ordinairement. C'est ainsi qu'en avril 1882, on a essayé au Creusot deux barreaux de 16 millimètres de diamètre, pris dans des aciers à canon, l'un à l'état naturel, l'autre ayant été soumis à une pression de 50 kilogrammes par millimètre. On a trouvé :

	Barreau naturel.	Barreau comprimé.
Limite d'élasticité	29 k.	57 k.
Charge de rupture (par millimètre carré de section primitive).	58 ^{1,5}	75 k.
Allongement pour 100 (mesuré sur 50 millim.)	25	24

Le métal avait donc été durci dans une très forte mesure par la compression, sans avoir sensiblement perdu de sa ductilité.

Ces essais ont été renouvelés en octobre 1883, et on les a fait porter sur quatre

sortes d'acières dont les numéros correspondent à des teneurs de plus en plus élevées en carbone, et dont l'analyse sommaire est donnée dans le tableau suivant :

	N° 1	N° 2	N° 3	N° 4
Carbone	0.101	0.246	0.507	0.810
Silicium.	0.065	0.070	0.110	0.190
Soufre	0.052	0.050	0.025	0.052
Phosphore.	0.018	0.051	0.051	0.029
Manganèse.	0.340	0.120	0.540	0.520

Les barreaux étant encore tournés au diamètre de 16 millimètres, on a trouvé :

	ACIERS NATURELS				ACIERS COMPRIMÉS			
	N° 1	N° 2	N° 3	N° 4	N° 1	N° 2	N° 3	N° 4
Limite d'élasticité.	24	22.5	31.5	42	53	54.5	51	80
Charge de rupture	40.5	42.75	65	79.5	45.75	51.75	72.75	156.5
Allongement	42	52	24	10	37	30	20	10

Ainsi que le fait judicieusement remarquer M. Carnot dans son rapport à la Société d'encouragement, auquel nous empruntons les données ci-dessus, ces résultats, bien que fort intéressants, ne sont pas encore suffisants pour faire aux procédés de compression une place décisive dans les opérations de la métallurgie pratique. C'est une nouvelle voie qui s'ouvre aux expérimentateurs, et il convenait de la faire connaître ici.

Outre cette augmentation de résistance, la compression à chaud donne aux aciers qui lui sont soumis une propriété spéciale qui n'est obtenue ordinairement qu'au moyen de la trempe par immersion. C'est la faculté de recevoir et de conserver la force coercitive que nous avons eu l'occasion de définir et d'étudier au chapitre précédent. C'est là ce qui constitue aujourd'hui un des côtés les plus intéressants des recherches de M. Clémardot; l'acier trempé par compression présente même à cet égard une supériorité sur l'acier trempé par immersion, en ce sens que le premier peut être recuit et forgé sans perdre son aptitude à l'aimantation, tandis que l'acier trempé par les anciennes méthodes, lorsqu'il est soumis à un recuit au rouge, revient presque à l'état naturel et perd une grande partie de sa force coercitive. C'est là un fait remarquable, et qui mérite d'être rapproché d'un autre fait également constaté dans l'acier comprimé, à savoir la conservation, même après le recuit, de la finesse de grain qui le rapproche de l'acier naturel. Il semble donc que le rapprochement et peut-être le soudage des particules d'acier, opérés pendant le refroidissement sous pression, aient des effets plus stables que ceux produits par la trempe ordinaire. On a pu constater par exemple qu'un barreau d'acier courbé en V, puis comprimé, et un autre barreau de même poids comprimé d'abord à l'état de règle

droite, puis réchauffé et courbé à la forge, comme le premier, pouvaient l'un et l'autre porter environ vingt fois leur poids, après avoir été aimantés à saturation.

On pourra probablement profiter de cette stabilité des effets obtenus pour augmenter la puissance des aimants comprimés. Quelques expériences semblent indiquer en effet que la force magnétique peut être accrue en soumettant une barre déjà comprimée à une seconde compression après forgeage. D'autre part, un barreau comprimé d'abord peut ensuite être trempé à l'eau et recevoir une aimantation puissante. Il est donc probable que la fabrication des aimants comprimés ne tardera pas à se perfectionner, mais on peut dès à présent reconnaître à la compression une supériorité marquée sur la trempe sous un certain rapport. Elle s'applique en effet sans difficultés aux aciers les plus durs et qui fournissent précisément les meilleurs aimants, tandis que la trempe les fait souvent éclater ou fendre. Par exemple les aimants à 3 ou 4 pour 100 de tungstène, considérés actuellement comme susceptibles de la plus grande puissance magnétique, sont tellement exposés à la fissuration que souvent on renonce à les tremper à l'eau et que l'on se borne à employer pour eux la trempe à l'huile, qui ne permet pas d'obtenir une aimantation aussi énergique. La compression au contraire permet d'obtenir les mêmes effets par une opération définie et mesurable ; on peut ainsi *tremper à telle pression*, comme on dit *marcher sous telle pression de vapeur*, et les avantages qui en résultent pour un travail méthodique se laissent saisir bien facilement.

Nous terminerons par une dernière indication qui surprend au premier abord. Il n'est pas nécessaire, pour obtenir la trempe, que la compression s'exerce sur toutes les faces. C'est ainsi que pour des barres elliptiques comprimées suivant un petit nombre de leurs arêtes, la masse du métal a été modifiée dans toutes ses parties comme cela a lieu dans la trempe par les bains.

Nous revenons maintenant à des opérations d'une pratique plus courante au moins jusqu'à présent et qui, au lieu de s'exercer sur la pièce entière, ne sont pratiquées que sur certaines de ses parties. C'est par le poinçonnage que nous commencerons.

Poinçonnage. — On sait depuis longtemps que le perçage des trous au moyen du poinçon altère la qualité du métal, tandis que le forage à la mèche ne produit pas d'effets analogues. De nombreuses expériences avaient été faites à ce sujet, mais la plupart du temps elles avaient été poursuivies sans méthode, en faisant varier à la fois plusieurs éléments, de sorte qu'il était impossible d'en rien déduire de précis. En 1875, M. Barba avait publié, sous le titre d'*Étude sur l'emploi de l'acier dans les constructions*, les résultats d'essais méthodiques faits à l'arsenal de Lorient et qui permettaient déjà de se rendre compte des effets du poinçonnage. M. Considère a repris la question en opérant de la manière suivante.

Une première série d'expériences a été faite sur des barrettes découpées dans

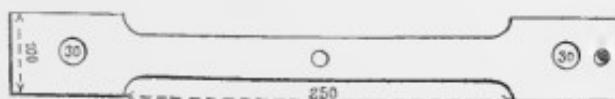


Fig. 8

des tôles de 10 millimètres d'épaisseur et ayant la forme indiquée dans la figure ci-dessus.

Le poinçon avait 17 millimètres, la matrice 18 millimètres de diamètre, et le trou était fait à l'intersection du grand axe et du petit axe de la lame comme la figure l'indique. Quant aux deux trous de 50 millimètres pratiqués dans les deux oreilles, ils servaient au passage de broches d'acier au moyen desquelles la barrette était soumise à une traction croissante, jusqu'à ce que la rupture se produisit :

Les résultats obtenus, mis en regard de la composition chimique d'un acier Bessemer et d'un acier Martin, sont résumés dans le tableau suivant :

NATURE du MÉTAL	TENEUR EN					RÉSISTANCE NORMALE DE L'ACIER NON PERCÉ	RÉSISTANCE DES BARRETTES PONÇONNÉES	
	Manganèse	Carbone	Soufre	Phosphore	Silicium		Larges de 52mm	Larges de 80mm
Acier Martin . .	0.54	0.22	0.05	0.060	0.42	54 ^{kg} .56	48.4	41.2
Acier Bessemer.	0.58	0.55	0.04	0.073	0.44	60 ^{kg} .00	55.1	44.8

Nous nous trouvons en présence de ce fait inattendu que la résistance des barrettes ponçonnées par millimètre carré de section utile, est, dans de certaines limites au moins, d'autant plus faible que la largeur est plus grande. On pouvait se demander si la moindre altération des barrettes étroites ne venait pas de ce qu'elles pouvaient s'allonger et s'élargir plus librement sous l'effet du poinçon. Pour élaircir ce point M. Considère a répété le même essai sur des barrettes de 52 millimètres, mais en percant le trou de poinçon avant de les réduire par le rabotage à leur arête définitive. Il a trouvé dans ce cas 47 kilogrammes de résistance pour l'acier Bessemer, c'est-à-dire des chiffres sensiblement égaux à ceux obtenus dans le cas précédent. Cet effet supposé de ponçonnage ne se confirmait donc pas.

Pour pousser l'étude plus avant, une seconde série d'expériences a été faite sur des barres ayant la forme représentée sur la figure 9.

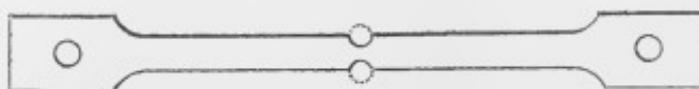


Fig. 9.

Deux trous de poinçon étaient percés en face l'un de l'autre au milieu de la longueur de l'éprouvette, et les faces étaient ensuite rabotées jusqu'à l'alignement des centres de ces trous. Le tableau suivant indique les résultats obtenus en faisant varier l'écartement des trous de 5 à 50 millimètres.

DÉSIGNATION de l'ACIER	RÉSISTANCE NORMALE	RÉSISTANCE PAR MILLIMÈTRE CARRÉ DES BARRETTES POUR UN ÉCARTEMENT DES TROUS DE					
		5 millim. ^a	6 millim. ^a	8 millim. ^a	14 millim. ^a	20 millim. ^a	30 millim. ^a
		kilog.	kilog.	kilog.	kilog.	kilog.	kilog.
Acier Martin . . .	51.5	67.60	65.4	64.0	52.4	45.1	42.9
Acier Bessemer . .	60.0	—	—	73.7	62.5	52.9	48.2

En examinant cette échelle, on constate que les résistances vont sans cesse en diminuant et que cette diminution est en raison inverse de la distance des trous. A peu près égale à la résistance normale pour un écartement de 14 millimètres, elle va en diminuant jusqu'à 42 kilogrammes pour le Martin et 48,2 pour le Bessemer, lorsque la distance des trous a atteint 50 millimètres.

On pouvait se demander si ces résultats n'étaient pas la conséquence de ce fait bien connu, que lorsqu'une barrette présente une section étranglée très courte, elle peut supporter une tension supérieure à la résistance normale du métal essayé en longue éprouvette prismatique. Pour se fixer sur ce point, M. Considère a répété le même essai sur une barrette en acier Martin identique, mais dont les trous étaient percés à la mèche et écartés de 5 millimètres; la résistance a été de 59^{41/2},50, c'est-à-dire supérieure de 8 kilogrammes à la résistance normale de cet acier. Il y a donc lieu de diminuer de 8 kilogrammes environ les résistances constatées pour les barrettes de 5 millimètres, afin de tenir compte de l'influence de leur forme, et il reste démontré que l'influence proprement dite du poinçonnage leur a donné une augmentation de résistance de 15 pour 100 environ. On se trouve donc en présence de ce fait que le poinçonnage augmente la résistance du métal quand les trous sont très rapprochés, qu'il ne la modifie pas quand l'écartement des bords extérieurs des trous est porté à 14 millimètres et qu'il la diminue ensuite d'autant plus que l'écartement des trous dépasse cette valeur. Ces chiffres ne s'appliquent d'ailleurs qu'à des tôles de 10 millimètres percées de trous cylindriques de 17 millimètres, et pour arriver à établir une loi complète de ces effets, il faudrait évidemment faire une série d'expériences dans lesquelles l'épaisseur des barres d'essai et le diamètre des trous varieraient dans un certain rapport.

M. Considère a déjà commencé ce travail en faisant un grand nombre d'essais sur des barreaux pris dans des tôles d'épaisseur variant entre 8 et 15 millimètres, qui intéressent spécialement le constructeur; il a constaté que dans ces limites l'épaisseur influe peu sur les effets du poinçonnage. Pour des tôles minces en acier Martin doux ces effets deviennent au contraire fort sensibles, comme le montre le tableau ci-dessous :

Grosseur de	Perte de résistance
8 mm	22 p. 100
6	19
4	16
2	14
1	12

Pour expliquer les résultats constatés dans ces diverses expériences, M. Considère rappelle une observation très intéressante faite par M. Barba en 1875. Ce dernier avait en effet réussi à isoler la bague de 1 millimètre d'épaisseur formée par le métal qui constitue la paroi intérieure du trou poinçonné; il avait alors reconnu que cette bague essayée à l'état naturel se brise sous la pression sans pouvoir subir d'aplatissement sensible, tandis qu'essayée après recuit, elle devient malléable et peut s'aplatir complètement sans se briser, comme les bagues analogues provenant de trous forés à la mèche. Ce fait prouvait donc que la diminution de résistance des tôles poinçonnées devait être attribuée à une altération de la nature du métal et non à des fissures produites par l'action du poinçon, car s'il en existait, le recuit serait impuissant à les faire disparaître. Le métal reçoit donc au contact du poinçon un écroussement intense qui augmente sa résistance, et diminue considérablement son allongement avant rupture. On peut alors, comme le fait M. Considère, expliquer tous les phénomènes constatés de la manière suivante.

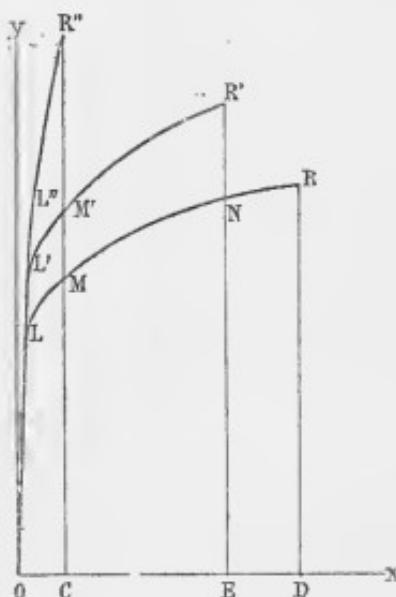


Fig. 10.

« La courbe de déformation du métal naturel étant représentée par OLR, la courbe de déformation du métal altéré au contact du poinçon est représentée par une ligne telle que OL''R'', qui est celle du métal fortement écroui, et qui correspond à une résistance élevée et à une déformation extrêmement faible.

« Le métal intermédiaire, par exemple celui qui est à un millimètre du trou, a une courbe de déformation intermédiaire, telle que OL'R'.

« Lorsqu'on soumet à un effort de traction la barrette formée de ces métaux accolés, le métal le plus écroui se brise dès que l'allongement de la barrette est égal à OC, et sa rupture entraîne celle de toute la section. Il est évident qu'à ce moment la tension du métal naturel est égale à CM, celle du métal intermédiaire à

CM' , et celle du métal écroui à CR'' , ces valeurs correspondant pour les divers métaux accolés à un même allongement OC .

« Si la barrette est très large, la tension moyenne de la section n'est que fort peu influencée par la valeur de la tension dans la partie écrouie, qui a peu de largeur, et elle est par suite très voisine de CM , tension du métal naturel, et très inférieure à sa résistance normale DR .

« Si au contraire la barrette est très étroite, où les trous très rapprochés, ce qui revient au même, il ne reste pas entre les trous de métal non altéré, et la tension moyenne est intermédiaire entre CM' et CR'' et par suite supérieure à la résistance normale DR .

« Il est également facile d'expliquer ce qui a lieu lorsqu'on enlève 1 millimètre de métal autour du trou. La courbe $CL'R''$ disparaît avec le métal enlevé, et la rupture se produit, lorsque la barrette a pris un allongement OE égal à l'allongement de rupture du métal situé à 1 millimètre du trou. La tension moyenne de la section est alors intermédiaire entre EN et ER' et se rapproche beaucoup de la résistance normale DR . »

Nous avons tenu à reproduire textuellement l'explication donnée par M. Considère, des phénomènes qui accompagnent le poinçonnage au point de vue de la résistance à la rupture. Cette explication est pleinement confirmée par la pratique. Si l'on examine une barre poinçonnée et brisée par traction, on constate que le trou s'est allongé de 1^{mm},5 au plus, tandis que les trous forés ou recuits s'allongent de 4, 5, 6 millimètres, et parfois de 7^{mm},5 avant de se briser. Il est facile de se rendre compte du danger que présente l'emploi à froid d'une pièce se trouvant dans le premier de ces deux états. Il est donc utile de faire disparaître l'altération due au poinçonnage. Mais cela est plus ou moins nécessaire suivant la nature de l'acier employé. Le tableau suivant, qui s'applique à des barrettes de 70 centimètres de largeur et de 10 millimètres d'épaisseur, donne à cet égard d'utiles renseignements.

NATURE de L'ACIER	TENEUR EN		RÉSISTANCE normale à LA RUPTURE	RÉSISTANCE après POINÇONNAGE	PERTE DE RÉSISTANCE	
	CARBONE	MANGANESE			EN KILOGRS	POUR 100
Bessemer très doux . . .	0.18	0.27	47.0	37.6	9,4	20
Martin doux . . .	0.22	0.34	52.5	41.2	11.3	22
Bessemer demi-dur . . .	0.35	0.38	60.0	44.8	15.2	25
Bessemer dur . . .	0.60	0.50	81.7	55.4	28.5	34

La perte de résistance due au poinçonnage augmente donc avec la résistance elle-même, et ses conséquences sont d'autant plus graves que le métal est plus dur.

L'écrouissage jouant, comme on l'a vu, un rôle important dans les effets du poinçonnage, M. Considère a voulu avec raison soumettre à ses expériences un acier ayant subi au préalable cette opération, ainsi que les autres changements d'état que le chapitre précédent a fait connaître comme pouvant être produits par la chaleur. Les résultats sont consignés dans le tableau suivant.

ÉTAT DE L'ACIER	RÉSISTANCE normale à LA RUPTURE	RÉSISTANCE après POINÇONNAGE	PERTE DE RÉSISTANCE	
			EN KILOGRANNES	POUR 100
Aacier recuit	49.0	56.9	12.4	24
Le même non recuit	52.5	41.2	11.5	22
Le même trempé	65.0	55.4	8.4	14
Le même écroui	54.5	49.2	5.5	10

La diminution de résistance due au poinçonnage est d'autant moindre, que le degré d'écrouissage préalable du métal est plus élevé, comme on devait le prévoir.

Le recuit étant l'inverse de l'écrouissage, exerce naturellement une influence fâcheuse sur la résistance définitive, lorsqu'il a lieu avant le poinçonnage, parce qu'il a pour effet d'exagérer la différence entre le métal écroui par le poinçonnage et celui qui ne l'est pas. Il est au contraire un remède absolu quand il a lieu après le poinçonnage, parce qu'il fait disparaître à la fois l'écrouissage et les tensions intermoléculaires des parties altérées et rend au métal son homogénéité.

Tout ce qui a été dit jusqu'à présent s'applique au cas où l'effort est assez grand pour amener la rupture du barreau. Les études de M. Considère ont également porté sur les phénomènes qui peuvent se produire lorsque la tension reste inférieure à la charge de rupture; les expériences qu'elles exigent sont beaucoup plus délicates, et M. Considère demande à les continuer avant d'en présenter les conclusions. Il indique en terminant que les aciers poinçonnés se trouvent dans des conditions particulièrement mauvaises pour résister à la flexion. Si l'on prend en effet la barrette de la figure 8 et si on la plie au point où le trou est percé, on constate qu'elle se brise dès que la flexion a atteint un angle de 15 à 25°, tandis qu'une barrette du même acier percée au foret ou recuite après poinçonnage peut supporter sans se rompre une flexion de 90 à 150°.

Cisaillage¹. — Le cisaillage des tôles, c'est-à-dire l'opération qu'on leur fait subir pour leur donner certaines formes simples, ou les amener exactement aux dimensions voulues, produit une altération analogue à celle qui est due au poinçonnage. Toutefois les efforts en sont bien moins marqués; ainsi la résistance moyenne de la tôle n'en est pas sensiblement altérée et l'allongement n'est réduit que de moitié environ, lorsqu'on la mesure sur une bande de 50 millimètres de largeur et de 100 millimètres de longueur. Enfin le pliage que peut subir sans se rompre une tôle d'acier cisaillée s'éloigne peu de 70 à 80°, tandis que celui d'une barre poinçonnée n'est que de 15 à 25°. Une bande de la même tôle, mais ayant ses bords limés ou découpés à la raboteuse, peut se replier bord sur bord jusqu'à 180°.

Nous n'avons pas craint de nous arrêter longtemps sur ces études, dont les conséquences pratiques apparaîtront plus clairement encore lorsque nous traiterons de

1. Il ne faut pas confondre le cisaillage, opération purement pratique, opérée au moyen d'outils spéciaux qui portent le nom de cisailles, avec le cisaillement, effort moléculaire dont nous avons indiqué le sens au chapitre II.

l'emploi des aciers sous leurs diverses formes. Un exemple montrera dès à présent leur utilité. Lorsque les rails en acier firent leur apparition, on trouva naturel de continuer à enlever par le poinçon les trous de boulons d'éclisse comme on le faisait pour les rails en fer sans en ressentir nul inconvénient. Dans les rails d'acier cette manière de faire occasionna dès les premiers mois de la mise en service de nombreuses cassures passant par les trous de boulons, et exigeant le remplacement du rail. Ces accidents se renouvelèrent jusqu'au moment où le forage des trous, succédant au poinçonnage, mit fin à la difficulté. On avait pu heureusement, dans ce cas, trouver le remède au mal sans l'avoir analysé comme les travaux de M. Consideré permettent de le faire aujourd'hui.

CHAPITRE VII

CLASSIFICATION DES ACIERS

Principe des diverses classifications. — Classification de Tunner pour les aciers de Neuberg.
Classification des aciers suédois. — Classifications françaises.

Tout ce qui a été dit dans les chapitres précédents montre qu'une classification des aciers doit se heurter aux mêmes difficultés que leur définition. En toutes choses les bonnes classifications sont rares, et elles présentent surtout cette particularité de varier suivant les temps, suivant les lieux, et, il faut bien le dire aussi, suivant le point de vue spécial auquel on se plaît. Les aciers n'échappent point à cette loi. Prend-on comme point de départ la composition chimique et la teneur de l'élément constituant prédominant, on a les aciers, carburés, manganésés, chromés, siliceux, phosphoreux, etc.; veut-on surtout envisager la manière dont ils se comportent dans le travail auquel ils sont soumis, nous avons une série d'aciers extradoux, doux, mi-durs, durs, trempés, recuits, etc. Le mode de fabrication peut aussi servir de base, et la classification distingue alors les aciers Bessemer et Martin, les aciers puddlés, cémentés, fondus au creuset, naturels, etc. Le commerçant distinguera les aciers anglais des aciers de Styrie ou de ceux de la Loire, et là certaines marques spéciales viennent encore introduire un nouvel élément de complication. Il ne saurait donc être question ici d'une méthode d'exposition, et la meilleure manière d'atteindre notre but sera de faire connaître par ordre chronologique les classifications adoptées dans les divers pays par les établissements qui font autorité dans cette matière.

La plus ancienne classification que nous connaissons est celle dite « Échelle de Tunner », et employée à l'usine de Neuberg par ce savant métallurgiste. Elle repose sur la teneur en carbone, ce qui a particulièrement sa raison d'être pour des aciers contenant très peu d'autres substances comme ceux de Neuberg; elle comprend 7 numéros, auxquels Tunner avait reconnu correspondre un allongement et une certaine résistance mis en regard dans le tableau suivant.

ÉCHELLE DE TUNNER

NUMÉRO de CLASSEMENT	TENEUR en CARBONE	ALLONGEMENT TOTAL	RÉSISTANCE à la RUPTURE	EMPLOI CORRESPONDANT
7	0.12	Pour 100 50 à 25	Kilogs. 40 à 48	Pièces de machines.
6	0.28	25 à 20	48 à 56	Fûles et essieux.
5	0.50	20 à 10	56 à 72	Rails et bandages
4	0.75	10 à 5	72 à 88	Outils tranchants, limes.
3	1.00	5	88 à 104	Trépans, ciseaux, etc.
2	1.25	»	»	Rarement employés.
1	1.50	»	»	

Quelques usines autrichiennes, en employant cette classification, avaient encore renchéri sur elle. C'est ainsi qu'à l'usine de Reschitzza on a longtemps distingué, pour les numéros les plus employés :

Le numéro 6 doux avec	0,22 de carbone.
* 6 juste	0,28
» 6 dur	0,56
» 5 doux	0,42
» 5 juste	0,50
» 5 dur	0,58 etc., etc.

C'était peut-être pousser un peu loin la minutie, et si la méthode Eggertz, employée pour la détermination du carbone, n'eût pas permis, entre les mains d'un chimiste exercé, d'arriver, par la différence des colorations, à des échelons aussi rapprochés, on se fût sans doute contenté de l'échelle de Tunner primitive, qui suffisait largement pour la pratique, surtout à l'époque dont nous parlons.

Dans son mémoire de 1867, Gruner mentionnait une échelle suédoise, analogue à celle de Neuberg, mesurée à la suite de la trempe et établissant 9 numéros d'acier Bessemer; à savoir : 1, 1 $\frac{1}{2}$, 2, 2 $\frac{1}{2}$, etc., jusqu'à 5: la teneur en carbone du n° 1 était de 2 pour 100, celle du n° 5 de 1 pour 100, celle du n° 4, de 0,50 pour 100, et celle du n° 5 de 0,05. Le parallélisme des aciers suédois et autrichiens se trouvait ainsi bien établi.

A l'exposition universelle de 1873 à Vienne, les aciers étrangers étaient classés pour la plupart d'après les principes ci-dessus énoncés; par contre, l'usine du Creusot, dont la belle exposition, organisée si peu de temps après la guerre, était bien faite pour satisfaire notre amour-propre national, présentait déjà une classification originale, et que nous tenons à faire connaître, parce que nous y trouvons

pour la première fois l'indication, pour les échelons successifs, à côté des nuances de dureté, des différences résultant de la composition chimique du métal. De plus cette classification fait entrer en ligne de compte la striction et la charge correspondant à la limite d'élasticité. Elle inaugurerait donc une nouvelle ère de recherches, et nous croyons utile de la reproduire en son entier (bien qu'elle remonte à une époque déjà lointaine), telle qu'elle était communiquée aux visiteurs de l'exposition.

Une notice jointe à ce tableau fournissait les explications complémentaires suivantes :

La première qualité A formait alors la grande masse de la production, elle correspondait à la généralité des métaux Bessemer et Martin, et à certains aciers au creuset fabriqués en Angleterre, en Belgique et en France ; elle était utilisée habituellement pour les rails et pour tous autres objets de fabrication courante. Les rails étaient en outre fabriqués dans les numéros de dureté variant de 5 à 5, suivant les préférences des compagnies, les conditions de pose, de climat, de trafic, etc.

La qualité C correspondait à une pureté de métal exceptionnelle, comme celle des meilleurs aciers au creuset, provenant des fers au bois de la marque supérieure Dannemora.

La qualité B était intermédiaire entre A et C.

Pour les barreaux soumis à la trempe, cette opération avait été faite à l'huile sur le barreau élevé aussi uniformément que possible à une même température correspondant au rouge vif. Quant au coefficient de qualité à chaud, il était déterminé par un procédé empirique appliqué depuis longtemps à des fers de toute provenance et consacré par l'expérience.

Ces recherches étaient si complètes, qu'elles n'ont pu être, depuis lors, en ce qui concerne le procédé de fabrication acide, sensiblement modifiées. Il est par contre intéressant de mettre en regard de cette classification, celle qui a été adoptée d'une manière à peu près générale par lesaciéries du nord de la France, qui emploient le procédé basique en vue de la déphosphoration¹ (page 66).

Ce tableau montre que les aciers provenant de fontes phosphoreuses, peuvent aujourd'hui, comme nous avons déjà eu l'occasion de l'affirmer, rivaliser de qualité avec les produits similaires des meilleures marques. Des résistances à la rupture de 40 kilogr. par millimètre carré, avec un allongement d'environ 50 pour 100, caractérisent un métal éminemment propre à la fabrication des tôles de toute sorte, des longrines, des rivets, des câbles métalliques pour lesquels, il y a quelques années, les meilleurs fers étaient exclusivement acceptés. Si l'on tient compte de ce fait, que ces aciers doux possèdent, tout aussi bien que le fer, la précieuse propriété de la soudure, on en arrive à cette heureuse conclusion qu'avant peu le puddlage, cette opération si pénible pour l'ouvrier et toujours incertaine dans ses résultats, aura complètement cédé la place aux puissants procédés de fabrication dont l'étude va maintenant nous occuper.

1. Comme nous avons déjà eu l'occasion de le faire remarquer, il est bien difficile dans un ouvrage comme celui-ci de ne pas empiéter quelquefois sur les chapitres qui suivent. C'est ainsi que nous sommes conduits, pour traiter à fond les questions générales de classification, à parler de procédé acide et de procédé basique sans avoir encore indiqué en quoi ils consistent et en quoi ils diffèrent.

CLASSIFICATION DU CREUSOT

ESSAIS A LA TRACTION	MARQUE	NUMÉROS								
		de	1		2		3		4	
			Non trempé.	Trempé.	Non trempé.	Trempé.	Non trempé.	Trempé.	Non trempé.	Trempé.
Barreaux tournés de 200 mm^2 de section et de 100 mm de longueur.	alifié.	A	15 s	2 s	15 s	4,8	17 s	7,2	19 s	9,4
		B	13 s	3,8	15 s	5,7	17 s	7,8	10 s	10,2
		C	13 s	5 s	15 s	6,6	17 s	8,6	19 s	10,8
Allongement permanent au mo- ment de la rupture.		A	72,6	117 s	75,6	110,5	70,5	105,6	66,8	90,8
		B	77,7	119,5	74,9	115 s	71,8	108 s	68,2	99 s
		C	79 s	125 s	76,2	118,5	75,2	112 s	69,8	104,8
Charge de rupture par mm^2 de section primitive.		A	95,2	149 s	98,5	120 s	101 s	122 s	103,2	125,5
		B	98 s	125,2	101 s	128 s	104,2	150,8	107 s	153,5
		C	100,2	132,2	104 s	156 s	108 s	141 s	115 s	146,5
Striction ou rapport de la section rompue à la section primitive..		A	0,800	0,980	0,740	0,950	0,697	0,865	0,646	0,790
		B	0,795	0,950	0,740	0,900	0,687	0,827	0,636	0,743
		C	0,788	0,950	0,752	0,867	0,678	0,794	0,617	0,720
Charge correspondant à la limite d'élasticité.		A	59 s	72 s	57,8	68,5	56,4	65,8	54,9	60,6
		B	41,1	78,5	40 s	75,5	58,8	71 s	37,5	65,4
		C	45,2	85 s	42,2	82 s	41 s	78 s	59,8	72,5
Coefficient de qualité à chaud..		A	120		120		120		120	
		B	125		125		125		125	
		C	130		130		130		130	

A L'EXPOSITION DE 1873

DE DURETÉ.

5		6		7		8		9		10		11	
Non trempé.	Trempé.												
21	21	41,1	23	43,2	23	44,6	27	48	29	21	20	20	20
21	21	42,6	25	44,8	25	47	27	49,5	29	22	32	24,2	20
21	21	43,5	23	46	25	48,2	27	50,6	29	23,4	32	27,6	33
62,6	62,6	88,8	58	78,7	55,2	68,6	49,2	61,2	45	55,2	20	20	20
64,4	64,4	91	59,7	82	55	75,8	50,5	65,8	46,7	58,8	41,5	51,2	20
65,9	65,9	99	61,5	89,8	56,8	81,2	52,2	72,6	48,2	65,8	45,5	55,2	50,5
105,6	105,6	125	101,8	126,5	108	128,4	110	129,7	114	134,5	20	20	20
110,8	110,8	136,5	113	138,7	115,2	142	119	145,4	125	147,5	127	152	20
115,5	115,5	151,2	119,6	156	125,2	160,5	127,5	165,4	132,6	170	140	175,2	146,6
0,595	0,595	0,710	0,544	0,625	0,495	0,555	0,441	0,475	0,595	0,428	20	20	20
0,582	0,582	0,670	0,529	0,500	0,477	0,520	0,425	0,455	0,579	0,598	0,525	0,557	20
0,570	0,570	0,655	0,514	0,575	0,460	0,503	0,409	0,440	0,565	0,575	0,510	0,505	0,568
55,2	55,2	56,2	51	50,5	28,8	45,8	26,6	37,8	22,5	55,6	20	20	20
55,8	55,8	62,1	55,8	55	31,8	49,8	29,6	44,7	27,5	40	25,6	33	20
58,5	58,5	68,8	56,5	62,2	34,8	56,9	32,7	51,2	30,7	45,5	27,8	37,2	24,4
120	120	120	-	120	-	115	-	110	-	20	-	20	-
125	125	125	-	125	-	120	-	115	-	110	-	20	-
130	130	130	-	130	-	125	-	120	-	115	-	110	-

CLASSIFICATION DES ACIERS DÉPHOSPHORÉS

ÉCHELLE de dureté.	DEGRÉ de trempe.	RÉSISTANCE en K ^m par mm ² carré de section.	ÉTROGEMENT p. % sur une barre de 406 mm de longueur.	TENEUR en carbone.	USAGES.
1. EXTRA DUR . . .	Trempe extra.	80 à 105	9 à 5 %	0,05-0,80	Ressorts fins. Limes. Fraises. Scies. Outils tranchants divers.
2. Très dur . . .	Trempe très bien	75 - 80	12 - 9 %	0,60-0,50	Rails. — Bandages spéciaux. Ressorts de Voitures, Wagons et Locomotives. Glissières et Pièces de machines soumises au frottement Broches de filatures. Marteaux
3. Dur	Trempe bien.	70 - 75	15 - 12 %	0,50-0,45	Limes de fortes dimensions. Fleurts de mines. Fourches à foin. Fils durs. Socs de charrue.
4. Dur	Trempe.	65 - 70	18 - 15 %	0,45-0,35	Coutellerie. Pioches. — Pelles. — Bêches.
5. DEMI-DUR . . .	Trempe.	60 - 65	20 - 18 %	0,35-0,30	Rails et Éclisses, grands et petits profils. Bandages et Essieux pour Wagons et Locomotives.
6. DOUX	Trempe peu.	55 - 60	22 - 20 %	0,30-0,25	Pièces mécaniques soumises à des efforts de flexion et de torsion. Socs de charrue de fortes dimensions. Bandages de voitures et chariots.
7. DOUX	Ne trempe pas.	50 - 55	24 - 22 %	0,25-0,20	Ressorts de lits. Pièces d'armes.
8. Très doux . . .	Ne trempe pas.	45 - 50	26 - 24 %	0,20-0,15	Tôles et cornières pour navires et ponts. Tôles fines.
9. EXTRA DOUX . .	Doréent nerçant par la trempe.	40 - 45	28 - 26 %	0,15-0,10	Longrines et traverses de chemins de fer. Tirefonds. — Boulons. Billettes pour tréfilage. — Clous. — Pointes. Aciers cavaliers. Pièces estampées.
10. EXTRA EXTRA DOUX	Doréent nerçant par la trempe	35 - 40	32 - 28 %	0,10-0,05	Acier remplaçant le fer de Suède.

DEUXIÈME PARTIE

CHAPITRE VIII

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES DIVERS MODES DE FABRICATION DES ACIERS. — PROCÉDÉS DIRECTS DE FABRICATION.

Fonte malléable aciéreuse. — Acier de forge; bas-foyers et diverses méthodes qui les emploient. — Aciers puddlés. — Essais de réduction sans fusion. — Procédés Chenot, Blair. — Passage de la méthode directe à la méthode indirecte.

On a vu au chapitre premier que les aciers peuvent être obtenus par deux méthodes : d'une part, comme le fer doux, par *affinage direct*, d'autre part à l'aide de ce fer doux par *recarburation*. Avec une fonte donnée, la dernière méthode assure nécessairement un produit plus pur que la première, puisque en prolongeant l'affinage jusqu'au fer doux, on expulse les matières étrangères d'une manière à peu près complète, mais elle est plus coûteuse, car aux frais d'affinage on ajoute ceux de la recarburation. Malgré cela on l'applique presque toujours ; la cémentation, la fabrication de l'acier au creuset, les procédés Bessemcr et Martin en sont usage, et c'est l'étude de cette méthode, que nous appellerons avec Gruner *méthode indirecte*, qui nous occupera presque exclusivement.

Si la *méthode directe* tend à disparaître de plus en plus de la pratique industrielle, il convient de faire connaître au moins l'importance qu'elle a présentée autrefois. Ce chapitre lui sera donc entièrement consacré.

L'affinage direct peut à son tour être obtenu par trois voies différentes.

1° On peut opérer sur la fonte *solide*, à température plus ou moins élevée, mais sans fusion. Le produit qui porte le nom de *fonte malléable*, lorsqu'on décarbure entièrement, présente quelques applications industrielles dont l'étude serait à sa place soit dans un traité de fabrication des fontes, soit dans un traité de fabrication du fer doux, mais ne doit point nous occuper ici. Le même affinage, mais incomplet, produit la *fonte malléable aciéreuse*. Elle est sans emploi pratique en France, et a été utilisée autrefois en Allemagne sous le nom de *Glühsthal*.

2^e On peut opérer sur la fonte *fluide* de façon à obtenir un produit *solide* qui sera, selon le degré de décarburation, du fer doux ou de l'acier naturel, c'est-à-dire le fer ou acier *de forge* des bas foyers, ou bien le fer ou acier *puddlé* des réverbères.

3^e On peut traiter la fonte *fluide* à une température assez élevée pour que le produit lui-même demeure *fluide*. On y parvient par les procédés dits de réaction et par l'affinage Bessemer. Ce dernier procédé ne reste toutefois un des représentants de la méthode directe que si l'affinage n'est point poussé jusqu'au bout, et n'exige point par suite une recarburation finale. Cet affinage incomplet n'est d'ailleurs possible qu'avec des fontes très pures et manganésifères ; nous l'avons vu longtemps employé en Styrie et aux usines de Reschitz, mais même dans ce cas l'opération est plus difficile à conduire et la recarburation finale est toujours préférable à notre avis.

Méthodes d'affinage direct sans fusion. — Cet affinage consiste à oxyder lentement le carbone de la fonte par des agents solides. Son emploi est de date bien ancienne, car Réaumur, dans son *Art de fabriquer l'acier*, publié en 1722, recommande, pour adoucir la fonte, de la chauffer au milieu du fer brûlé, alors appelé *safran de Mars*. C'est une sorte de cémentation oxydante, et comme le fait remarquer Gruner avec raison, des trois méthodes directes c'est évidemment la moins parfaite, car si les éléments étrangers peuvent tous être oxydés, on ne peut réellement éliminer que ceux dont les produits oxydés sont volatils, tels que le carbone, le soufre et l'arsenic. Elle ne peut donc être appliquée qu'à des fontes très pures, et comme le graphite est difficile à attaquer, il faut encore qu'elles soient blanches ou rendues blanches par la refonte. Les fontes de Styrie provenant du fer spathique répondent à ces exigences ; aussi cette fabrication s'est-elle maintenue dans quelques petites usines des environs de Léoben jusqu'au moment où le développement du procédé Bessemer est venu, là comme partout ailleurs, lui porter le dernier coup.

Méthodes d'affinage direct après fusion. — Bien qu'étant en pleine décadence, ces méthodes qui ont, comme nous l'avons vu, le bas-foyer et le four à puddler comme auxiliaires méritent de nous arrêter un peu plus longtemps.

Fabrication de l'acier de forge, ou naturel, au bas-foyer. — La forme, la disposition générale et les dimensions principales des bas-foyers sont fort variées. Tantôt c'est une simple cavité creusée en terre, comme le foyer des nègres du centre de l'Afrique ou celui des anciens Celtes dans notre vicille Europe, tantôt un foyer couvert en fonte et en briques avec une seule tuyère, comme le foyer comtois qu'on rencontre encore dans quelques vieilles forges au bois (fig. 11, 12 et 13) ou bien encore un vaste bassin à 6 tuyères comme les fineries des forges anglaises que les figures 14 et 15 représentent.

Quelles que soient leurs dispositions spéciales, les bas-foyers présentent tous deux inconvénients ; le premier résulte du contact plus ou moins intime du combustible avec la fonte à affiner. Ce contact est nuisible en soi, puisque l'affinage est basé sur l'oxydation, tandis que le combustible agit en réducteur. Comme Gruner le résume

en termes heureux, ce que l'air fait, le charbon le défait, de sorte que par cela même, l'épuration est retardée et rendue imparfaite. Ce motif joint à la forte consommation de combustible suffisait pour faire disparaître le procédé.

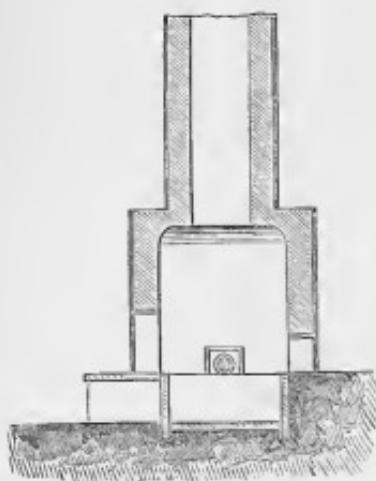


Fig. 41.

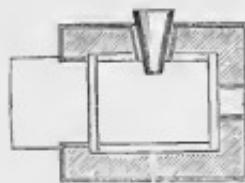


Fig. 42.

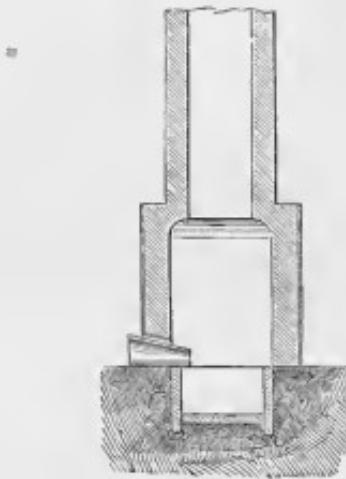


Fig. 43.

Le second inconvénient que présentent les bas-foyers, surtout ceux à plusieurs tuyères, c'est qu'à chacune d'elles correspond une région spéciale de combustion très nuisible à l'homogénéité des produits. La température est élevée et par suite les réactions sont vives vers le centre du foyer, là où frappent les jets de vent; l'affinage est lent et incomplet sur les bords, où domine l'oxyde de carbone. A force

de travail et en brassant la matière on peut, il est vrai, remédier au mal tant que le métal demeure fluide, mais s'il passe promptement à l'état solide, comme c'est le cas pour l'acier, le défaut d'homogénéité devient d'autant plus sensible que la charge est plus forte. C'est le motif pour lequel on n'opère en Suède que sur des masses de 50 à 40 kilogrammes quand on veut produire des aciers de première qualité.

On distingue dans l'affinage au bas-foyer, la méthode de l'Isère, ou de Franche-Comté, la méthode de Thuringe, les méthodes styrienne et carinthienne, nivernaise, bergamasque, etc. Elles diffèrent par la profondeur du foyer et par l'inclinaison

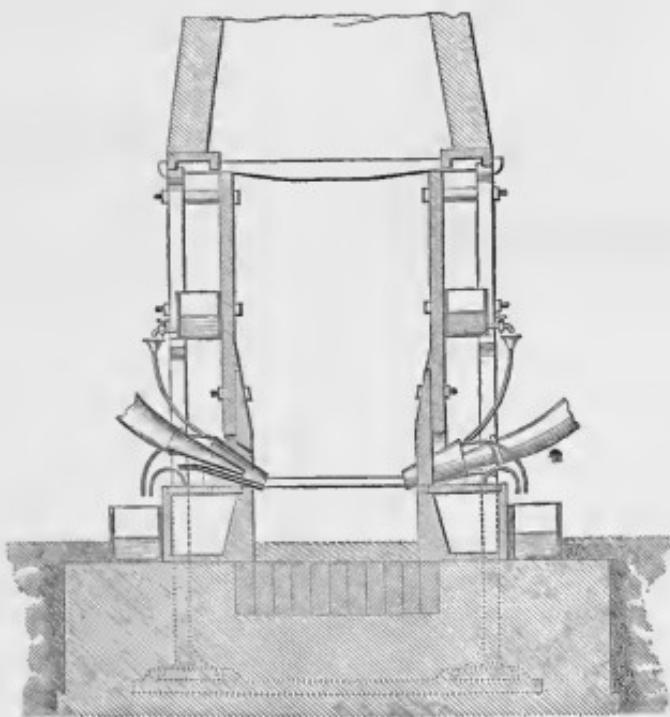


Fig. 14.

des tuyères, ou bien encore par le poids de la charge et le temps consacré à l'opération. En Suède et en Bourgogne on ne traitait que 50 à 40 kilogrammes par opération, et alors chaque opération ne durait guère plus d'une demi-heure; dans le Berry et en Franche-Comté, où le poids chargé variait de 80 à 140 kilogrammes, le temps nécessaire à chaque charge atteignait une heure et demie à trois heures. En Allemagne, où la fonte traitée s'élevait au poids de 200 kilogrammes, l'affinage durait cinq heures et dans certains cas atteignait près du double de ce chiffre. La consommation de charbon de bois, le seul combustible utilisable dans les méthodes décrites ci-dessus, variait de 1000 à 1800 kilogrammes par tonne d'acier produit. Ces chiffres montrent que s'il existe encore aujourd'hui quelques bas-foyers dans les gorges

boisées des montagnes, leur dernière heure sonnera bientôt, d'autant plus que la qualité des aciers de forge ou naturels, ainsi qu'on désignait ces produits, ne justifie pas les frais énormes que leur fabrication impose.

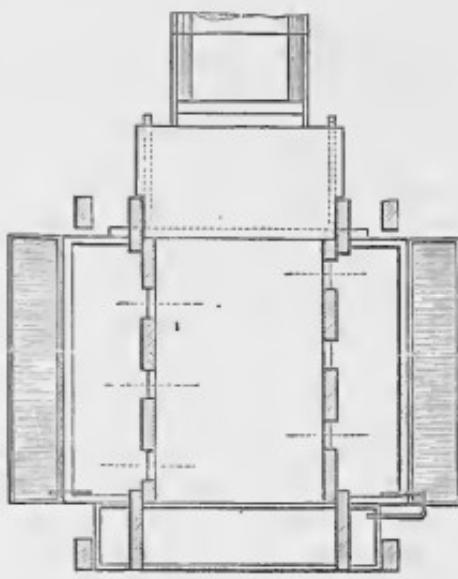


Fig. 15.

Fabrication de l'acier puddlé. — La fabrication de l'acier au four à puddler a été par rapport à l'emploi du bas-foyer un progrès incontestable. Bien que le puddlage soit, comme on sait, d'origine anglaise, l'initiative de la fabrication de l'acier puddlé revient à la Prusse rhénane, où les premiers essais furent entrepris en 1858, à l'instigation de Karsten, en employant les fontes lamelleuses du pays, particulièrement aptes à ce genre de fabrication; de là, le procédé s'est répandu en Styrie, en Suède et dans les usines françaises et anglaises disposant de fontes de qualité. Depuis l'origine des chemins de fer jusqu'à l'année 1860, époque à laquelle le procédé Bessemer a fait son apparition, l'acier puddlé a contribué pour une large part à la fabrication des rails et bandages, sans compter tous ses autres emplois. S'il succombe aujourd'hui, c'est après avoir enrichi bien des usines, et laissé une large trace dans les progrès de la métallurgie contemporaine.

C'est surtout en étudiant l'acier puddlé qu'on peut voir combien est étroite la limite qui sépare les produits aciéreux des produits ferrueux. Nous avons vu fabriquer bien souvent dans les usines de Westphalie des rails dits en fer à grain fin (Feinkorn-eisen) qu'on cuit pu tout aussi bien considérer comme compris dans les aciers doux. Vouloir décrire la série des phénomènes qui se produisent dans une charge de puddlage pour acier, c'est côtoyer constamment la même opération ayant en vue la production du fer de qualité. On peut bien dire d'une manière générale que l'acier exige le puddlage *gras, chaud ou bouillant* tandis que le fer se contente

d'un puddlage *sec et froid* moins coûteux, mais cette étude comparative sera toujours mieux à sa place dans le volume de cette encyclopédie consacré au fer et à sa fabrication; il en est de même de la description des appareils de cinglage et de corroyage qui s'appliquent aux loupes, dont l'élaboration mécanique est semblable dans les deux cas.

Cette formation de loupes, plus volumineuses que dans le bas foyer, mais dont le poids pouvait pourtant difficilement dépasser 100 kilogrammes, était un des graves inconvénients du puddlage pour acier. Quels que fussent les soins donnés à l'opération, la loupe devait être considérée comme une éponge imbibée de silicates, et l'expulsion de ses scories était toujours fort difficile. De plus pour la fabrication de grosses pièces, telles que les bandages, les rails, les tôles de fortes dimensions, il était nécessaire de former des paquets, composés de loupes laminées et corroyées une ou deux fois, et qui prenaient alors le nom de *mises*. L'homogénéité de ces mises et leur soudure irréprochable était le perpétuel souci de l'ingénieur, jusqu'au moment où la production du métal fondu en grande masse a permis de résoudre définitivement la question.

Procédés Chenot et Blair. — Dans les deux cas que nous venons d'examiner, l'affinage se fait en partant de la fonte, c'est-à-dire d'un demi-produit obtenu non par une simple *réduction*, mais par une *fusion réductive*. Quelques métallurgistes avaient pensé, et l'idée était certainement séduisante, qu'au lieu de fondre les minéraux au haut fourneau en incorporant au produit fondu une quantité notable de corps à éliminer ultérieurement, il vaudrait mieux les réduire simplement à l'état d'*éponges douces* ou d'*éponges carburées*. En opérant à une température moins élevée, on espérait obtenir des produits plus purs et consommer moins de combustible. La suppression du haut fourneau est une conception à laquelle sont venus se beurter déjà bien des esprits, et parmi les plus persistants dans cette voie, il convient de citer Chenot père, qui s'occupa le premier de la question dès 1850 et poursuivit ses recherches jusqu'à sa mort. En 1855 quelques fourneaux pour la réduction du minerai riche furent établis à Baracaldo, près de Bilbao, et plus tard, en 1856 et 1857, des appareils analogues furent installés par Chenot fils à Ilautmont, Couillet, etc., mais ils furent tous successivement abandonnés, sauf ceux de Baracaldo, qui fonctionnaient encore il y a quelques années, mais d'une manière peu active.

L'appareil Chenot se composait d'une cornue prismatique en briques réfractaires, à parois à peu près verticales et s'évasant légèrement vers le bas pour faciliter la descente des charges. Ces cornues étaient réunies deux à deux de manière à former un massif sensiblement carré; elles avaient comme dimensions 10 mètres de hauteur, 4^m,50 de longueur et 4^m,50 de largeur. On trouvera une description plus complète de ces appareils dans le deuxième volume de métallurgie générale de Gruner, et l'atlas qui y est joint en fournit même le dessin.

Malgré l'insuccès des tentatives de MM. Chenot, le même principe a été appliqué en Amérique en 1875, par l'ingénieur Blair; son four, qui consiste également en un massif de cornues verticales, ne diffère de celui de Chenot que par deux ou trois détails de construction peu importants. La forme cylindrique des cornues, dont le diamètre est de 0^m,90 et la hauteur de 12 mètres, les rend plus solides et facilitent

la descente des éponges métalliques, mais l'action de la chaleur y est moins intense, et en Amérique, pas plus qu'en France, le four Blair ne s'est répandu.

Au lieu de foyers ordinaires à la houille, les cornues de réduction peuvent être chauffées par des foyers à gaz ou avec la chaleur perdue d'autres fours. C'est ainsi que Gates a proposé en Angleterre de chauffer l'appareil Chenot au moyen d'un gazogène, et que Renton, en Amérique, chercha en 1850 à réduire le minerai de fer dans une cornue placée au bas de la cheminée d'un four de puddlage. Les cornues Renton n'avaient que 5 mètres de hauteur. On mêlait au minerai, pour la réduction, 20 pour 100 d'anthracite ; l'éponge réduite arrivait dans le four de puddlage par intervalles réguliers en soulevant un simple registre, et elle y recevait le coup de feu final destiné à fondre les matières terreuses et à souder les particules métalliques. Étant donnée l'époque où elle fut conçue, cette idée était ingénieuse, mais la réduction était incomplète, le déchet fort élevé, et le bas de la cornue, grâce à l'excès de chaleur du four à puddlage, rapidement corrodé. Il est difficile de coordonner dans un même four deux opérations distinctes, la réduction par la chaleur perdue, et l'affinage sur la sole du réverbère. La *division du travail*, ce grand principe de l'industrie moderne, s'applique aussi bien aux choses qu'aux hommes, et nous aurons souvent l'occasion de le constater aussi bien pour les appareils mécaniques que pour les appareils où les réactions chimiques et calorifiques se produisent.

Affinage de la fonte fluide avec produits affinés fluides. Les méthodes précédentes, soit qu'on parte des minerais eux-mêmes (procédé Chenot et dérivés), de la fonte solide (fer malléable acieréux), de la fonte liquide (bas foyer et puddlage), aboutissent toujours à un produit solide ou tout au moins pâteux. Par les procédés qui vont suivre, on affine la fonte à une température assez élevée pour obtenir la liquéfaction complète du produit. Tout étant fluides, les scories se séparent complètement du produit métallique, comme dans les hauts fourneaux le laitier se sépare de la fonte. On a des lingots homogènes qui par cela même sont beaucoup plus tenaces que les loupes péniblement soudées des méthodes précédentes. C'est l'avantage de ces procédés, et tout le secret de leur supériorité ; mais, comme le disait Gruner dès 1867, cette supériorité incontestée renferme en germe la complète transformation du travail du fer et de l'acier.

L'affinage avec produits fluides peut s'obtenir de deux manières : dans le premier cas il s'opère essentiellement par l'oxygène de l'air ; c'est le procédé Bessemer, qui a pris un énorme développement, et comme variante le procédé Bérard, qui ne s'est pas répandu. Dans le second cas on affine au moyen d'agents solides tels que le fer et l'oxyde de fer ; c'est la méthode dite par réaction, déjà indiquée par Réaumur et même par Yanacecio pour l'acier de forge, puis recommandée pour l'acier fondu par Clouet, Mushet, Hassenfratz, le capitaine Uehatius, etc. La fusion se faisait alors au creuset comme dans les usines où l'on fond l'acier cémenté, tandis que maintenant on a recours au four à réverbère. Hassenfratz parle de ce dernier four dès 1812. Plusieurs fabricants l'ont essayé en Angleterre de 1845 à 1855. Plus tard, en 1858, MM. Sudre et MM. Petin et Gaudet s'en sont servis momentanément en France, mais le procédé n'est devenu pratique qu'à la suite des tentatives prolongées du commandant Alexandre dans les fonderies nationales de Villeneuve et de Ruelle, en 1861, et

surtout par les soins de M. P. Martin dans son usine de Sireuil en 1864. Bien que M. Martin ait d'une part utilisé la grande invention de Siemens, et de l'autre les indications de Clouet et de Mushet, c'est à son énergique persistance que le procédé de fusion de l'acier sur sole doit d'avoir pris rang à côté du procédé Bessemer dans la grande industrie, auquel il rend de nombreux services, surtout pour la refonte des déchets et l'utilisation des vieilles matières; aussi a-t-il conservé son nom.

Passage à la méthode indirecte. — Nous avons été conduits à classer les procédés Bessemer et Martin dans les méthodes directes d'affinage, et cependant, toujours pour l'acier Martin, presque toujours pour l'acier Bessemer, on complète l'opération par une addition généralement à l'état liquide, qui est une véritable recarburation, et a aussi quelquefois pour but d'introduire dans le bain métallique certaines substances dont nous avons reconnu l'utilité, telles que le manganèse, le chrome et même le silicium. Ces méthodes sont donc en quelque sorte des méthodes mixtes, et elles servent d'intermédiaires entre les précédentes et la seule vraiment indirecte qui soit encore appliquée aujourd'hui, c'est-à-dire la cémentation. Il en est de même de la fabrication de l'acier au creuset qui suivant, le mélange employé, peut passer de l'une à l'autre. Sans insister plus longtemps sur ces différences, nous abordons maintenant la description aussi complète que possible de la fabrication de l'acier Bessemer, en commençant par l'étude de l'opération proprement dite c'est-à-dire des réactions chimiques qui l'accompagnent.

CHAPITRE IX

FABRICATION DE L'ACIER BESSEMER

Étude du principe et de la marche de l'opération. — Aperçu historique. — Nature et analyses des fontes employées. — Division de l'opération en périodes et caractères de chaeneune d'elles. Allures de l'opération. Arrêt. — Emploi du spectroscope. — Examen analytique du bain métallique, de la scorie et des gaz à divers moments de l'opération.

Aperçu historique et étude du principe de l'opération. — Ce fut en 1856, il y a près de trente ans, qu'Henry Bessemer fit, dans une séance mémorable de l'Association britannique, réunie à Cheltenham, sa première communication sur la *Fabrication du fer et de l'acier sans combustible*. Il eut à lutter pendant plusieurs années pour convertir les métallurgistes de l'époque à des idées qui leur paraissaient inexplicables, et ses compatriotes ne furent pas les moins difficiles à convaincre. L'exposition de Londres, en 1862, vint à point pour faire connaître le nouveau procédé aux savants et aux ingénieurs qui s'y étaient donné rendez-vous, et encouragé par leurs rapports favorables, M. Jackson construisit à Saint-Seurin, près de Bordeaux la première cornue qui ait fonctionné en France. Cet exemple fut bientôt suivi par les usines d'Imphy, d'Assailly, de Terre-Noire et de Mutterhausen. En même temps Tunner, en Autriche, donnait tout son appui au développement du nouveau procédé; les premiers appareils furent installés dans ce pays à Turrach et à Heft, petites usines situées dans les Alpes autrichiennes, puis en 1864, dans l'établissement impérial de Neuberg, qui devait, sous la direction de Tunner, devenir une pépinière d'aciéristes distingués.

En Angleterre le développement du procédé Bessemer avait suivi une marche analogue; en 1861 la production totale de l'acier de toute catégorie y était à peine de mille tonnes par semaine, tandis qu'en 1866 le seul acier Bessemer formait déjà un total hebdomadaire de 5000 tonnes. Parmi les premiers ateliers construits on peut citer à Sheffield ceux de MM. Brown et Cie (Atlas Iron Works) et de MM. Camel et Cie (Cyclops Iron Works), à Crewe, la grande usine du North Western railway, enfin dans le pays de Galles les deux forges de Dowlais et de Ebbw-vale, qui en 1867 possédaient déjà chaeneune six cornues.

Réduit à ses traits essentiels, le procédé Bessemer consiste à faire passer dans une sorte de grand creuset, désigné ordinairement sous le nom de *cornue* ou de *convertisseur*, au travers de la fonte en fusion, un très grand nombre de minces jets d'air fortement comprimé. Cet air accomplit à lui seul les trois opérations que réelame tout bon affinage; il *oxyde*, *chauffe*, *brasse* la matière métallique.

Il est aisé de concevoir que la dernière de ces conditions soit remplie, et même surabondamment, si l'air comprimé est introduit par le fond même de l'appareil qui renferme la fonte. Il doit en résulter un bouillonnement intense, abstraction faite des réactions chimiques qui peuvent encore le favoriser. Quant aux deux autres effets, à savoir l'oxydation et le chauffage ils sont compris tous les deux dans le phénomène de combustion ; l'essence du procédé repose donc sur la présence dans la fonte d'éléments combustibles assez efficaces pour développer par leur combustion la haute température nécessaire pour le maintien à l'état liquide du fer affiné. Par un concours de circonstances particulièrement heureux, ces éléments combustibles sont précisément ceux que toute fonte sortant du haut fourneau contient nécessairement, et ceux aussi dont elle doit être débarrassée pour se transformer en acier plus ou moins doux ; comme on a coutume de le dire dans les démonstrations mathématiques, ils sont *nécessaires et suffisants* pour assurer la transformation de la fonte en acier, et c'est ce fait si simple, et si longtemps méconnu qui a fait la fortune de l'inventeur.

Ce fait nous semble simple aujourd'hui, et pourtant une grave objection pouvait être faite en commençant ; on pouvait craindre qu'en faisant passer de l'air froid au travers d'un bain de fonte, le fer ne se figerait avant que la combustion se fût assez développée pour combattre le refroidissement. On pouvait craindre aussi que le fer ne fût trop fortement oxydé, ce qui aurait eu pour conséquence un déchet tel que le procédé fût devenu par cela même impraticable. L'expérience a répondu à toutes ces objections ; on a vite reconnu que le fer n'est presque pas atteint, au moins d'une *façon permanente*, lorsqu'il est associé à une proportion suffisante de carbone, de silicium et de manganèse ; on a constaté également que la chaleur emportée par les gaz et les parois de l'appareil est plus que compensée par l'oxydation des éléments, du moins dès que l'on opère sur plus de 500 à 1000 kilogrammes de matière.

Nature et analyses des fontes employées.— C'est donc la fonte qui apporte elle-même le combustible nécessaire à son affinage, et sa composition chimique doit, par suite, exercer la plus grande influence sur la marche de l'opération et la qualité des produits. Le tableau suivant donne l'analyse d'un assez grand nombre de ces fontes, dont nous avons autant que possible indiqué ensuite les conditions essentielles de fabrication. Nous rappelons encore que ces données ne s'appliquent qu'au procédé Bessemer, exclusivement employé jusqu'en 1878, et qu'on désigne aujourd'hui sous le nom de procédé acide, par opposition au procédé basique employé en vue de la déphosphoration. Tout ce qui concerne le procédé basique sera réuni dans un chapitre spécial.

ANALYSES DE FONTES BESSEMER

	FONTES AU BOIS							
	NEUBERG		RESCHITZA		BOGGSAN		FAGERSTA	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Fer.	90,507	92,705	95,561	89,960				
Manganèse.	5,400	2,179	1,607	4,441				
Carbone total.	5,950	5,545	5,785	4,749				
Graphite.	5,480	5,507	5,705	0				
Carbone combiné.	0,750	0,057	0,078	0				
Silicium.	1,960	1,460	0,859	0,771				
Soufre.	0,018	traces	0,002	0				
Phosphore.	0,040	0,068	0,064	0,027				
Cuivre.	0,085	0,059	0,051	0				

	FONTES AU COKE							
	WOR- KINGTON n° 1		WOR- KINGTON n° 2		ASKAM		SAINT- JACQUES	
	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Fer.	93,53	94,21	93,64	89,81	92,48	91,07	92,880	92,512
Manganèse.	0,10	0,05	0,02	3,45	0,81	5,59	0,718	2,050
Carbone total.	5,89	4,44	4,84	2,92	2,75	2,69	5,211	5,232
Graphite.	0	0	5,37	2,57	2,42	2,02	2,741	5,005
Carbone combiné.	0	0	0,46	0,55	0,25	0,07	0,470	0,137
Silicium.	2,58	1,29	2,42	4,66	5,48	2,74	2,418	1,657
Soufre.	0,01	0,01	0,00	0,07	0,01	0,01	0,050	0,050
Phosphore.	traces	0	0,01	non dosé	0,10	0,04	0,087	0,107
Cuivre.	0	0	0	0	0,02	0	0,051	0,051

La fonte de *Neuberg* provient d'excellents minéraux spathiques de Styrie ; leur seul défaut est d'être un peu cuivreux, comme comme l'indique l'analyse. Le combustible employé a été le charbon de bois tendre, et la température de l'air soufflé était peu élevée.

La fonte de *Reschitza* a été obtenue au moyen des minéraux magnétiques et des hématites brunes de Morawitz et de Dognaska. Ce sont des minéraux riches tenant en moyenne 55 pour 100 de fer. Ils renferment peu de manganèse ; ce métal est introduit dans la fonte au moyen de minéraux d'une faible teneur en fer, mais tenant jusqu'à 20 pour 100 d'oxyde de manganèse ; ces minéraux sont malheureusement assez phosphoreux, d'où la teneur relativement élevée en phosphore. Le combustible employé est un excellent charbon de bois dur (hêtre et chêne presque exclusivement). L'air a été chauffé à l'époque où les analyses ont été faites par des appareils en fonte donnant environ 300°.

La fonte de *Bogdan* est fabriquée dans les mêmes conditions que celle de Reschitz, quant aux minerais ; mais le combustible est un mélange de charbon de bois et de coke. Elle est employée en seconde fusion, tandis que les deux précédentes sont chargées directement du haut fourneau dans le convertisseur.

La fonte de *Fagersta* a été placée ici comme type des fontes suédoises, si renommées pour leur pureté. Elle est comme toutes ses congénères remarquable par sa faible teneur en silicium et en phosphore.

Si nous passons maintenant aux fontes au coke, nous rencontrons deux analyses de fontes anglaises de *Workington*. Ces fontes d'hématites ont été longtemps considérées en Allemagne, et spécialement dans les grandes usines du bassin de la Ruhr, comme le type par excellence des fontes Bessemer. D'une grande pureté, contenant juste la quantité de silicium nécessaire pour une bonne allure de l'opération, leur seul défaut était de ne contenir que peu de manganèse. Comme elles étaient toujours employées en seconde fusion ; on y suppléait en ajoutant dans le cubilote ou le réverbère où se faisait la refonte quelques centièmes de fontes manganésifères du pays de Nassau (*Spiegeleisen*, fonte miroitante) ou bien en faisant une forte addition de ces fontes à la fin de l'opération.

La fonte d'*Askam*, qui est également une fonte d'hématite anglaise, rentre dans la même catégorie que les deux précédentes.

Nous avons déjà eu l'occasion de signaler la haute teneur en silicium des fontes de *Saint-Jacques*. On cherchait avec raison à la combattre par une forte proportion de manganèse due à l'introduction dans le lit de fusion de minerais manganésifères d'Irun en Espagne. A l'époque dont nous parlons le combustible employé était du coke d'Ahus très dense, et l'air était chauffé à 350° par des appareils en fonte.

La fonte de *Kalan*, provient d'un haut fourneau marchant avec un mélange de coke et de lignites et traitant les excellentes hématites rouges qui forment de riches gisements dans les Karpathes, près de Vajda-Huniad en Transylvanie. La présence dans ces mêmes régions de mines de manganèse permet de faire varier la teneur de ce métal entre les limites indiquées par les échantillons I et II. La forte teneur en silicium était demandée spécialement par l'usine de Reschitz, qui les traitait en seconde fusion avec des fontes au bois peu siliceuses.

L'analyse de la fonte au coke de *Reschitz* (n° 11 du tableau) présente de grandes analogies avec celle des fontes de *Workington*. Elle est obtenue dans un haut fourneau de construction récente, chauffé à 700° par 4 appareils Withwell, et traitée en première fusion ; elle contient peu de manganèse, mais on obtient une proportion plus forte de ce métal dans la fonte d'*Anina*, établissement qui appartient comme Reschitz à la société autrichienne hongroise des chemins de fer de l'État, et à côté duquel se trouvent des minerais manganésifères plus exempts de phosphore que ceux dont dispose l'usine de Reschitz. Le mélange de ces deux fontes peut donc donner des produits d'excellente qualité.

Si nous examinons maintenant dans leur ensemble ces analyses, nous y constatons des analogies qui vont nous permettre d'indiquer d'une manière générale les propriétés que doit présenter une fonte Bessemer de bonne qualité.

La teneur en fer oscille aux environs de 92 pour 100 ; elle ne descend au-dessous de 90 que pour la fonte de *Fagersta*, à cause de sa haute teneur en manganèse, et pour la fonte de *Saint-Jacques*, par suite de l'abondance du silicium. Ces deux

corps sont avec le carbone ceux qui dominent à côté du fer, car le soufre, le phosphore le cuivre et les traces des autres métaux arrivent rarement à former une unité. On peut donc dire que dans une fonte Bessemer le total des trois *combustibles*, carbone, silicium et manganèse, varie de 8 à 10 pour 100, les autres corps, considérés tous comme nuisibles, ne devant, autant que possible, pas dépasser une unité.

Le carbone total se présente à l'état de graphite et de carbone combiné, et dans toutes les fontes où ces deux états du carbone ont été déterminés séparément, le graphite l'emporte dans une proportion considérable. C'est dans les fontes au bois qu'il atteint son maximum avec des teneurs oscillant autour de 3,50 pour 100. On sait que la présence du graphite, ou carbone à l'état libre, caractérise essentiellement les fontes grises. Les fontes Bessemer sont donc des fontes *grises*, et même *graphiteuses*, et dans les fontes au bois, dont la teneur en silicium est toujours faible, on cherche à forcer le plus possible cette teneur. Il nous est souvent arrivé, nous tenant auprès du haut fourneau lors de la coulée de ces fontes, d'en sortir couvert de paillettes brillantes qui voltigeaient dans tout l'atelier. La cassure d'un gueuset de cette même fonte montrait une texture à gros grains brillants et noirâtres, témoignant l'importance de la séparation du carbone.

Tandis que dans les fontes au bois la teneur en silicium n'atteint pas 2 pour 100, nous la voyons s'exagérer dans les fontes au coke, où, sauf dans les échantillons (6) et (12) elle est toujours supérieure à 2 pour 100 : ce fait s'explique, car tandis que les charbons de bois contiennent très peu de cendres, les cokes renferment des cendres argileuses dont la proportion descend rarement au-dessous de 10 pour 100. De plus, l'emploi du coke donne une allure beaucoup plus chaude qui facilite la réduction de la silice; mais, comme on le remarquera sans peine, il semble exister entre le carbone et le silicium une sorte d'incompatibilité, en ce sens que la proportion de carbone total diminue dans les fontes au coke dans le rapport où le silicium augmente, de telle sorte que la somme reste à peu près constante. L'ingénieur, connaissant du reste le total des éléments combustibles qui lui sont nécessaires pour mener à bien son opération Bessemer peut diriger la marche du haut fourneau de manière à les associer dans la proportion la plus avantageuse au point de vue du prix de revient.

Le manganèse se rencontre dans les fontes examinées en proportion très variables : très abondant dans les fontes de Neuberg, de Fagersta, de Kalau, il se trouve en beaucoup moins grande quantité dans celles de Workington, d'Askam et de Reschitz, qui donnent cependant d'excellents aciers. Lorsqu'il existe dans la fonte initiale, il intervient dans la combustion à côté du carbone et du silicium, et l'opération ne peut qu'y gagner, mais sa présence n'est pas absolument nécessaire ; nous avons déjà vu qu'il est utile surtout à la fin de l'opération, pour donner à la scorie la fluidité nécessaire à sa séparation complète d'avec l'acier, et agir comme réducteur énergique à l'égard du fer brûlé qui se trouve dans le bain métallique à la fin du soufflage.

Les fontes manganésées doivent donc être considérées comme des auxiliaires, le plus souvent indispensables, de l'opération Bessemer, et la série d'analyses que nous présentons ici nous permettra d'arriver pour elles à des conclusions analogues à celles que nous venons de formuler pour les fontes Bessemer proprement dites.

ANALYSES DE FONTES MANGANÉSÉES

	FONTE miroitante de Müsen.	FONTE miroitante de Saint-Louis.	FONTE spéculaire de Heft.	FERRO- MANGANESE de Terre-Noire. n° 1	FERRO- MANGANESE de Terre-Noire. n° 2
Fer.	82,860	88,781	91,496	50,500	49,617
Manganèse.	10,707	5,920	4,145	64,250	85,505
Carbone combiné . .	4,325	4,040	5,905	5,650	6,214
Silicium.	0,997	0,584	0,267	0,062	0,245
Soufre.	0,014	0,055	0,189	traces	0,005
Phosphore	0,059	0,000	traces	0,125	0,478
Cuivre.	0,006	0,046	traces	traces	0,018

Nous pourrions multiplier ces exemples, mais les cinq analyses ci-dessus suffisent pour caractériser les fontes désignées en Allemagne, leur pays d'origine, sous le nom de spiegelisen, traduit en français par le terme de fonte miroitante ou fonte spéculaire. Ce nom est dû à l'aspect spécial de ces fontes qui, toujours blanches, se présentent avec de larges faces de clivage semblables à de petits miroirs et liées essentiellement à la présence du manganèse coïncidant avec une très faible teneur en silicium. Quant au carbone, toujours entièrement combiné, sa teneur oscille aux environs de 4 pour 100.

La fabrication du spiegel, comme on l'appelle couramment dans les usines, a été longtemps une spécialité du pays de Nassau, où les minerais manganésifères se rencontrent en grande abondance. M. Jordan, qui a publié sur cette fabrication un travail considérable, l'a appliquée aux hauts fourneaux de Saint-Louis près Marseille, et la France a cessé ainsi d'être tributaire de l'étranger pour cet intéressant produit métallurgique. Jusqu'en 1875 la teneur en manganèse dépassait rarement 10 pour 100 quand le rôle de plus en plus bienfaisant de ce corps dans les aciers conduisit plusieurs usines à rechercher la production d'alliages à teneur plus élevée, qui prirent le nom nouveau de *ferro-manganèse*; les hauts fourneaux de Sava en Carniole présentaient déjà à l'exposition universelle de Vienne des ferro-manganèse à 50 pour 100; bientôt l'usine de Terre-Noire, qui avait d'abord pratiqué cette fabrication à l'aide du four à réverbère, produisit au haut fourneau des alliages renfermant jusqu'à 85 pour 100 de manganèse, c'est-à-dire dans lesquels les rapports existant autrefois entre le fer et le manganèse dans le spiegel se trouvaient absolument renversés. Les usines de Saint-Louis à Marseille, de Saint-Jacques à Montluçon, pour ne parler que de la France, entrèrent promptement dans cette voie, et si les ferromanganèses de 60 à 80 pour 100, sont encore plus chers aujourd'hui que les spiegels à 10 ou à 15 pour 100, on peut dire que les difficultés de la fabrication ne sont pas sensiblement plus grandes pour l'un que pour l'autre de ces deux produits.

Maintenant que nous connaissons les matières premières reconnues les plus con-

venables pour la fabrication de l'acier Bessemer, nous allons envisager l'opération elle-même et suivre son développement. Laissant provisoirement de côté les détails de construction de la cornue et des appareils en usage pour son chargement, pour la coulée du métal, etc., supposons une cuve à peu près cylindrique dans laquelle la fonte fluide occupe une hauteur de 0^m,50 à 0^m,40, et se trouve sillonnée verticalement de bas à haut par 100 à 200 minces jets de vent à une pression d'au moins 1 atmosphère. Ce sont là les conditions les plus ordinaires; on peut admettre en outre que le volume total de la cornue est environ 10 fois plus grand que celui de la fonte, et que l'ouverture par laquelle s'échappent les produits de la combustion présente une ouverture circulaire de 0^m,50 de diamètre environ.

Périodes de l'opération. — On divise ordinairement l'opération Bessemer en périodes marquées par la nature des combustions qui opèrent l'affinage. La proportion des combustibles pouvant différer, comme nous l'avons vu, en ce sens que le carbone, le silicium ou le manganèse prédominent chacun dans certaines fontes par rapport aux deux autres éléments, cette division en périodes sera forcément un peu arbitraire.

Tunner et ses élèves distinguent trois périodes; dans ses nouveaux travaux sur la fabrication du métal Bessemer en Russie, Teliernoff veut en reconnaître quatre, enfin la plupart des métallurgistes français n'admettent que deux périodes, l'une dite la période d'étincelles et l'autre la période de flammes.

Si cette dernière définition se distingue par sa simplicité, elle ne nous paraît pas analyser d'une manière tout à fait suffisante les phénomènes que l'opération présente, et prenant comme point de départ, des fontes analogues aux fontes anglaises de Worlkington et d'Askam, c'est-à-dire riches en carbone, moyennement siliceuses et peu manganésées, nous diviserons l'opération en trois périodes devant donner une durée totale variant entre 20 et 25 minutes.

La première période peut être caractérisée, au point de vue chimique, par deux faits principaux : la transformation du carbone libre ou graphite en carbone combiné, et l'oxydation du silicium ainsi que d'une partie du manganèse. Cette oxydation est-elle directe ou bien le fer s'oxyde-t-il d'abord pour réagir ensuite sur les deux éléments susnommés? cette question peut être considérée comme accessoire, mais la formation d'une scorie siliceuse due non seulement à la corrosion du garnissage de la cornue, mais aussi au silicium contenu dans le bain métallique, est hors de doute. Quelques expérimentateurs ont même été jusqu'à établir une relation entre la teneur en silicium et la durée de la première période, et à lui attribuer une durée d'autant de fois 5 minutes qu'il y a de centièmes de silicium dans la fonte. Il nous semble difficile de formuler une semblable règle, car la longueur de la première période dépend aussi d'autres circonstances telles que la température de la fonte, la pression du vent, etc. Il peut arriver que si la fonte est froide et la pression faible, le métal se figeant à l'entrée des trous de tuyère, le début de l'opération présente une longueur tout à fait inusitée. Nous avons constaté ce phénomène dans certaines usines où on désignait sous le nom de *stagnation*; la fonte y restait quelquefois une heure dans la cornue, comme *stagnante*, malgré le passage du vent, avant que les réactions chimiques de l'affinage commençassent à devenir manifestes. Il est inutile d'ajouter que ces stagnations étaient fort préjudiciables à la durée des appareils et à la marche

générale de l'atelier. Elles se produisaient le plus souvent avec des fontes fortement siliceuses, ce qui confirme au moins d'une manière générale l'influence attribuée au silicium sur la première période de l'opération.

En marche normale, la première période ne cause dans la cornue qu'un bruit à peine sensible, ce qui s'explique puisqu'elle correspond à la formation d'oxydes fixes. On voit sortir du col une légère gerbe d'étincelles accompagnée d'une petite flamme courte, jaunâtre et peu éclairante. Pour la nature de fontes dont nous étudions le traitement, sa durée est de 8 minutes environ. Elle peut s'abaisser à 6 et même à 4 minutes pour des fontes de seconde fusion, ne contenant que 1 à 1,50 de silicium.

La seconde période commence avec une flamme blanche plus fournie et de plus en plus éclairante ; le bruit du vent traversant le métal s'accuse et se manifeste par un bouillonnement violent qui imprime à tout l'appareil de fortes secousses. C'est la période de *décarburation*, par opposition à la première, qui peut être appelée période de *scorification* ou de *mazage*. Le carbone passe à l'état d'acide carbonique et d'oxyde de carbone, ce dernier en proportion de plus en plus forte à mesure que l'opération avance. La flamme qui en résulte sort en gerbe serrée d'une blancheur éclatante, tempérée par des fumées blanches d'autant plus intenses que le manganèse est plus abondant. C'est donc dans la seconde période que l'oxydation du manganèse paraît être la plus active ; et c'est ce métal qui avec le carbone en détermine la durée. Dans le cas présent cette durée peut être de 12 à 15 minutes ; M. Tchernoff a également remarqué que pour des fontes fortement carburées, mais très pauvres en manganèse, elle ne dépasse pas 4 à 5 minutes, et est par suite au moins aussi courte que l'est la première pour des fontes peu siliceuses.

L'intensité lumineuse de la flamme pendant la seconde période provient de la haute température des gaz en combustion ; la fin de la décarburation, qui commence en même temps la troisième période, se trouve nettement indiquée par l'abaissement de cette intensité lumineuse et la disparition du bouillonnement véritable, qui est remplacé par une sorte de roulement continu. En même temps les fumées blanches dues à la présence du manganèse deviennent rousses et assez abondantes pour obscurcir la flamme, qui du reste se rétrécit et semble rentrer dans l'appareil. A ce moment le silicium et le carbone ne brûlent plus, le manganèse a passé à l'état d'oxyde combiné avec la silice, et le fer brûle en plus forte proportion que dans les deux périodes précédentes. Cette troisième période est donc caractérisée par la combustion du fer ; sa durée est de deux ou trois minutes tout au plus ; si on la prolongeait, on paraîtrait revenir à la première période, avec cette différence que les étincelles sont remplacées par des fumées rousses très abondantes, et que la scorie devient de plus en plus ferrugineuse.

Allure de l'opération. — Les phénomènes qui accompagnent une opération Bessemer sont, comme on le voit, nombreux et de nature diverse. On désigne l'ensemble de ces phénomènes sous le nom d'*allure* de l'opération, et les ingénieurs distinguent à peu près dans toutes les usines une *allure froide*, une *allure normale* et une *allure chaude*, dont nous avons à faire connaître les caractères. Il ne s'agit, bien entendu, ici comme dans tout ce chapitre, que du procédé acide ; dans le procédé basique, le combustible prédominant étant, comme on le verra plus loin, le phosphore, les caractères sont tout différents.

L'allure froide est presque toujours causée par un manque de silicium dans la fonte ; lorsque cette teneur descend au-dessous de 1 pour 100, la scorification s'achève avant que la fonte ait atteint une température suffisante ; le bouillonnement résultant de la formation hâtive de l'oxyde de carbone se produit donc au milieu d'un bain trop épais ; le passage de l'air y étant en même temps difficile, l'opération devient tumultueuse, et il en résulte des *projections* de scorie et même de métal hors de l'appareil. Ces projections deviennent quelquefois une des grosses difficultés de l'opération, et nous avons vu, surtout avec des cornues de petites dimensions jusqu'à 15 ou 20 pour 100 de la charge lancées dans l'atelier, ce qui y cause un désordre inévitable. En même temps la flamme est très longue, comme translucide, accompagnée de peu de fumées, et les caractères qu'elle fournit ordinairement pour l'arrêt de l'opération cessent d'être saisissables. L'opérateur se trouve donc menacé, avec une semblable allure, d'obtenir sinon un métal de mauvaise qualité (car ces aciers résultant de fonte peu siliceuses sont en général très malléables), du moins de ne pas arriver exactement au degré de dureté qu'il se proposait d'obtenir. Nous verrons quelles difficultés lui causera, lors de la coulée, une opération de cette nature.

L'allure normale est celle qui a été étudiée avec détails en commençant ; nous n'aurons donc pas à y revenir et nous passons à l'allure chaude, qui, à l'inverse de l'allure froide, provient du silicium en excès ; elle se signale par la durée de la première période, qui y atteint rarement moins de 15 minutes ; la durée de la seconde période y dépend dans une certaine mesure de la teneur en manganèse ; quant à la troisième période, elle doit être en quelque sorte prolongée artificiellement pour éliminer autant que possible le silicium du produit fini, où il est, comme nous l'avons vu, particulièrement nuisible dans le travail à chaud. Il en résulte une flamme intense, des *fumées rousses* épaisses qui s'élèvent en panache au-dessus de l'atelier et permettent de reconnaître de tous les points de l'usine la nature de l'opération chaude ; en même temps la combustion, particulièrement active et prolongée, dégage une chaleur intense qui se manifeste dans le métal, lors de la coulée, par des difficultés d'un ordre tout autre que pour l'allure froide, mais qui sont au moins aussi nuisibles à la marche normale de l'atelier.

Arrêt. — Toutes les opérations, quelle que soit leur allure, aboutissent à un moment critique qu'on désigne sous le nom d'*arrêt*. La température du bain métallique allant toujours en croissant depuis le commencement jusqu'à la fin de l'opération, et la chaleur étant, comme on sait, le puissant auxiliaire de toutes les réactions chimiques, on comprend que celles-ci marchent en quelque sorte à pas de géant à la fin de l'opération ; à ce moment les secondes valent des minutes, et l'arrêt de l'opération Bessemer constitue une des tâches les plus délicates du chef d'atelier. Les cornues, contenant fréquemment aujourd'hui jusqu'à 12 tonnes de métal représentant une valeur d'au moins 100 francs la tonne, une opération manquée n'est point une bagatelle, même pour un grand établissement, et l'ingénieur soucieux de sa responsabilité doit apporter à cette partie de sa tâche les soins les plus constants. Il est du reste aidé dans son accomplissement par un instrument que la physique moderne considère comme une de ses plus belles conquêtes, et qui a beaucoup contribué au succès des études à la fois scientifiques et pratiques dont le procédé

Bessemer a été l'objet. L'idée d'employer le *spectroscope* pour analyser les flammes de la cornue est due à M. Bradge, ingénieur chez M. John Brown et C^e à Sheffield, et depuis 1864 son emploi s'est généralisé sur tout le continent, sinon d'une manière absolue pour déterminer l'arrêt de l'opération, du moins pour suivre la marche elle-même, et comme moyen de contrôle. On trouvera dans les divers mémoires de M. Tehernoff, et dans une communication faite par M. Deshayes au congrès de 1871 de l'Association française pour l'avancement des sciences, de nombreux détails sur les observations faites à l'aide du spectroscope ; nous nous bornons à en résumer ici les faits les plus saillants.

1^{er} Moyen d'arrêt : Emploi du spectroscope. — Au début de l'opération, lorsque la flamme est encore peu accusée, le spectre est pâle, continu et à peine visible. Plus tard, pendant la période de l'ébullition, lorsque la flamme est blanche et vive, on constate un spectre discontinu. En partant de la raie jaune du sodium, toujours très apparente dans la flamme du Bessemer, et en se dirigeant de là vers le violet, on aperçoit dans la région jaune et verte un grand nombre de raies alternativement sombres et claires, formant dans leur ensemble quatre groupes faciles à distinguer ; puis vient dans la partie bleue un cinquième groupe, qui est en général, comme le dernier groupe vert, plus pâle que les trois premiers. Or si l'on suit à travers la lunette du spectroscope une opération Bessemer tout entière, on reconnaîtra d'abord le groupe n° 2 à l'origine de la période décarburante ; ensuite apparaîtront les n°s 3, 4 et 5 ; enfin le n° 1, le plus près comme nous l'avons vu de la raie du sodium, se montrera le dernier de tous. Vers la fin de l'affinage, lorsque la flamme commence à faiblir, les quatre groupes s'évanouissent dans l'ordre inverse, d'abord le n° 5, puis les n°s 4 et 5, enfin le n° 2, tandis que le n° 1 persiste, quoique affaibli, jusqu'au moment où reparait le pâle spectre continu. Ce sont ces apparitions et disparitions successives qui peuvent guider pratiquement la personne chargée d'arrêter l'opération.

2^{me} Moyen d'arrêt : Examen du métal et de la scorie. — La flamme sortant de la cornue est entourée dans certains cas de fumées blanches ou rousses tellement abondantes que l'examen spectral se trouve très entravé. Il importe donc de pouvoir se renseigner par d'autres moyens sur le degré d'affinage du bain métallique. Nous avons vu qu'à la fin de l'opération le volume de la flamme diminue beaucoup, et pour certaines fontes, ce phénomène est si rapide et si précis qu'il en résulte une perception très nette du passage de la lumière à l'obscurité ; les praticiens désignent ce fait sous le nom de *tombée de flamme* et l'utilisent pour se guider dans l'arrêt de l'opération. Le bruit qui se produit dans la cornue est aussi un symptôme utile à observer, et tout cela permet, lorsque la composition chimique de la fonte traitée varie peu, ce qui est généralement le cas quand on marche en seconde fusion, d'arrêter l'opération sans se servir chaque fois du spectroscope. Il est un autre moyen de se renseigner, usité surtout en Autriche-Hongrie d'après les indications de Tunner, et auquel nous attachons pour notre part beaucoup d'importance. C'est l'examen d'une prise d'essai faite en plongeant rapidement dans le bain métallique l'extrémité aplatie d'un ringard. Une mince pellicule de scorie, renfermant presque toujours des grenailles métalliques, se fixe à l'extrémité du

ringard; on en hâte le refroidissement par immersion dans l'eau, puis on constate la couleur de la cassure, et la nuance plus ou moins foncée de la surface externe de la scorie. Tant que le bain est encore carburé, cette nuance est claire, passant de la couleur café au lait au jaune mielleux; à mesure que le carbone diminue, l'oxyde de fer augmente dans la scorie, et la couleur passe du jaune au brun, puis au bleu foncé et au bleu noir. En même temps la cassure, qui est d'un blanc verdâtre à l'origine, devient vert olive vers la fin et passe au noir lorsque le métal est tout à fait brûlé. L'usine de Reschitzka avait exposé en 1878 une série complète d'acières bruts classés de 1 à 7 suivant la méthode de Tunner, et avait mis en regard les scories correspondantes. Nous avons eu souvent l'occasion de constater dans cette usine qu'une différence de quelques secondes dans la durée du soufflage final suffit pour causer une différence très appréciable dans la couleur de la scorie. Ces caractères sont plus sensibles, il est vrai, pour les fontes au bois que pour les fontes au coke, mais nous croyons que, même lorsqu'on traite ces dernières, l'examen au moins intermittent des scories refroidies pourrait fournir d'utiles renseignements.

En même temps que l'examen de la scorie, celui des grenailles métalliques que le ringard ramène avec lui donne aussi un bon contrôle de l'état d'avancement de l'opération. Lorsque ces grenailles, posées sur une enclume, sont frappées par un marteau à main, elles s'aplatissent; les bords de la petite galette ainsi obtenue sont-ils ériqués, on peut en conclure que l'affinage n'est pas encore complètement terminé; l'aplatissement est-il au contraire trop facile et le métal s'écrase-t-il comme du plomb, on se trouve en présence d'un métal trop doux et une reearburation est nécessaire. Cet examen, fait régulièrement par une personne exercée, donne des indications d'une utilité incontestable.

Toutes les constatations signalées jusqu'à présent reposent sur des phénomènes d'ordre physique, l'idée devait se présenter naturellement de vérifier la marche de l'affinage par des prises d'essai successives du métal en fusion, dans lesquelles les éléments intéressants seraient dosés avec l'exactitude désirable. Ces expériences, qui ne peuvent se faire évidemment qu'à de rares intervalles, car elles troubleront la marche de l'atelier, sont particulièrement instructives lorsqu'elles sont accompagnées de l'analyse de la scorie prise au même moment. On trouvera dans le tome second du *Traité de métallurgie générale* de Gruner les résultats ainsi obtenus à l'usine de Neuberg dès 1866. Nous reproduisons ici des expériences de date plus récente, faites en 1878 à Reschitzka, dans le traitement de fontes au bois, et en 1880 à Bethléem en Pensylvanie, pour les fontes obtenues au combustible minéral, traitées dans les aciéries de ce nom. Dans le premier cas l'opération a été terminée immédiatement sans addition finale, tandis que dans le second on a recarburé au moyen de spiegel, dont la composition est indiquée dans le tableau.

ANALYSE DU MÉTAL

	RESCHITZA			BETHLÉEM					Présent Total
	Teste irradié.	Fin de la 1 ^{re} période.	Fin de la 2 ^{re} période.	Fin de l'opération	Teste irradié.	Après 8 minutes.	Après 15 minutes.	Après 18 minutes.	
Carbone combiné	0,057	1,905	0,662	0,427	0,586	1,784	0,906	0,024	0,541
Graphite	5,507	1,555	0,510	0,025	3,165	0,420	0,254	0,009	0,825
Carbone total	5,544	3,500	1,172	0,152	5,551	5,215	1,250	0,055	4,370
Silicium	1,460	0,915	0,536	0,044	2,391	1,090	0,107	0,057	0,060
Manganèse	2,179	1,550	0,557	0,189	0,495	0,150	0,155	0,101	16,145
Soufre	traces	traces	traces	traces	traces	traces	traces	traces	traces
Phosphore	0,068	0,063	0,058	0,059	0,089	»	0,092	0,076	traces
									0,090

Les analyses correspondantes de scories ont donné les résultats suivants.

	RESCHITZA			BETHLÉEM				Après Spiegel.
	Fin de la 1 ^{re} période.	Fin de la 2 ^{re} période.	Fin de l'opération	Après 8 minutes.	Après 15 minutes.	Après 18 minutes.		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)		
Silice	61,26	57,71	55,67	62,64	73,23	64,29	64,15	
Alumine	5,72	6,10	3,93	7,98	4,51	4,24	5,71	
Protoxyde de fer	0,76	5,30	10,52	4,91	»	»	15,47	
Protoxyde de manganèse	25,17	22,50	27,05	15,78	11,85	10,81	12,81	
Chaux	3,95	2,50	4,45	0,65	1,10	0,74	0,74	
Magnésie	0,50	0,28	0,45	0,48	0,64	0,28	0,25	
Acide phosphorique	0,01	0,05	0,05	»	»	»	»	
Fer métallique	1,94	0,62	1,52	10,12	8,71	7,70	2,50	

Nous n'entrerons pas dans la discussion du tableau relatif aux prises d'essai métalliques. Il confirme entièrement ce que nous avons dit en commençant sur le départ successif des divers combustibles renfermés dans le bain métallique. Il convient au contraire de fournir quelques détails relativement aux scories dont il a été peu question jusqu'à présent.

En ce qui concerne Reschitza, la scorie (1) était de couleur bleu verdâtre, dense et très dure avec une croûte extérieure de couleur brune; elle contenait beaucoup de globules de fer, car par l'aimant on est parvenu à en séparer jusqu'à 44 pour 100 de fer métallique; la prise d'essai suivante a donné une couleur d'un vert jaunâtre avec une couleur brune plus accentuée à l'extérieur. La dernière avait dans sa

cassure une couleur jaune, et se présentait avec une surface extérieure d'un brun foncé; elle ne contenait plus que 8 pour 100 de fer métallique.

Le fer métallique s'est également rencontré dans les scories de Bethléem. La proportion de grenailles extraites mécaniquement à l'aide d'un aimant était de 58,70 pour 100 au bout de 8 minutes et au bout des 18 minutes marquant la fin de l'opération de 16,80 pour 100; l'addition de spiegel a encore réduit la teneur à 14,19 pour 100.

Les investigations chimiques ayant pour but l'étude du procédé Bessemer ont porté non seulement sur les éléments solides, mais aussi sur les éléments gazeux de l'opération, qui représentent un volume considérable. Bessemer avait évalué à l'origine le volume du vent à introduire à 14 mètres cubes par tonne de fonte à la minute; mais aujourd'hui on obtient bien souvent 20 mètres cubes. Quant à la composition des gaz, elle a été étudiée en Angleterre par M. Snélus, à Dowlais, et en Suède par M. Tamm à l'usine de Westanfors. Ces recherches avaient surtout pour but de constater si l'air se trouve entièrement désoxydé dans son passage au travers de la fonte, et dans quelle mesure le carbone est transformé en oxyde de carbone. Les tableaux suivants indiquent les résultats obtenus.

ANALYSES DE M. SNÉLUS DANS UNE OPÉRATION QUI A DURÉ 18 MINUTES

ÉLÉMENTS EN VOLUME	APRÈS 2 minutes.	APRÈS 4 minutes.	APRÈS 6 minutes.	APRÈS 10 minutes.	APRÈS 12 minutes	APRÈS 14 minutes.
Acide carbonique	9,06	8,57	8,05	5,58	2,58	4,54
Oxyde de carbone	0,03	5,05	4,58	19,50	20,44	31,11
Oxygène libre	0,76	"	"	"	"	"
Hydrogène	89,25	0,90	2,00	16,85	2,46	67,55
Azote	86,58	85,57			66,02	

ANALYSES DE M. TAMM, A WESTANFORS

ÉLÉMENTS EN VOLUME	APRÈS 2 à 3 minutes.	APRÈS 8 à 10 minutes.	APRÈS 12 à 14 minutes.	APRÈS 17 à 19 minutes.
Acide carbonique	6,008	5,615	4,454	2,905
Oxyde de carbone	"	15,579	25,280	25,606
Oxygène libre	7,256	4,296	0,980	1,518
Hydrogène	"	1,412	1,040	1,120
Azote	86,436	76,400	68,256	68,961

Ces analyses offrent quelques différences qui tiennent à la nature des fontes et

à la marche de l'opération. En Angleterre comme en France, on a des fontes siliceuses, et par suite l'allure y est chaude. En Suède les fontes sont manganésées plutôt que siliceuses et le travail s'y fait plus lentement à la fin de l'opération. Cette double circonstance explique la plus grande abondance et la persistance de l'oxygène en Suède jusqu'à fin de la charge. A part cela, on voit qu'en Suède comme en Angleterre l'acide carbonique va en diminuant depuis l'origine jusqu'à la fin, et que pendant la deuxième période, lors de l'ébullition, il se produit presque exclusivement de l'oxyde de carbone. Quant à l'hydrogène, il doit surtout provenir de l'humidité de l'air injecté, et l'on voit qu'au premier moment lorsque l'acide carbonique n'est pas décomposé, la vapeur d'eau ne l'est pas davantage.

Addition finale. — Revenons après cette digression, nécessaire pour envisager l'opération Bessemer sous toutes ses faces, au moment où nous l'avons abandonnée, c'est-à-dire à l'instant précis où le passage du vent à travers le bain métallique vient d'être interrompu. Deux cas se présentent alors. L'affinage a pu n'être poussé que jusqu'au point nécessaire pour obtenir directement un métal possédant les qualités requises, et il ne reste plus alors qu'à procéder à la coulée avec les précautions qui seront indiquées plus loin ; ou bien l'affinage a été volontairement dépassé, et il y a dans le bain métallique un excès d'oxygène qui doit être éliminé par une addition de matières réductrices parmi lesquelles le carbone et le manganèse occupent le premier rang. Le spiegel et le ferro-manganèse qui les contiennent peuvent être introduits solides et froids, solides et chauffés au rouge, enfin fondus. Ils peuvent être incorporés au métal fondu soit dans la cornue, soit dans la poche où le contenu de la cornue est versé pour être ensuite réparti dans les lingotières. Enfin lorsque le mélange est fait dans la cornue, on peut ou bien la relever un moment pour le favoriser par un court brassage, ou bien la laisser immobile et s'en remettre pourachever le mélange au tumulte qui se produit lorsque le contenu de la cornue est versé dans la poche de coulée. L'emploi de l'addition fondu et le relèvement de la cornue avec passage du vent pendant quelques secondes donnent évidemment des garanties plus complètes, au point de vue de l'homogénéité, que les autres manières de faire que nous avons vu cependant employer souvent.

L'addition, lorsqu'elle est abondante et lorsqu'elle se fait à l'état liquide, est souvent accompagnée d'une forte réaction qui se manifeste par un long jet de flamme sortant du col de la cornue. C'est le cas qui se présente lorsque avec des fontes siliceuses on a poussé l'opération très loin afin de se débarrasser autant que possible de cet incommodé métalloïde. Le relèvement immédiat de la cornue peut causer une sorte d'explosion ou tout au moins une projection dangereuse d'une partie du métal en fusion ; la pratique de chaque atelier apprend bien vite sous quelle forme et avec quelles précautions l'addition doit être faite pour éviter de semblables inconvénients.

Il est une autre question plus importante, et sur laquelle les opinions diffèrent encore aujourd'hui. C'est celle de l'addition finale elle-même. Tandis qu'en Angleterre, en France et dans les usines de Westphalie elle est à peu près universellement pratiquée, plusieurs usines autrichiennes dont les produits sont justement renommés s'en dispensent, et si nos souvenirs sont fidèles, les aciéries de Seraing,

faisaient de même il y a quelques années. Les partisans de l'addition finale font valoir la sécurité qu'elle donne pour la teneur en manganèse du produit fini ; ses adversaires émettent des doutes sur l'union intime avec le métal fondu, constatent qu'elle apporte une complication de plus dans la marche de l'atelier et augmente le prix de revient, car les matières qu'on y emploie sont toujours plus coûteuses que la fonte soumise au traitement. Sans vouloir trancher ici une question dont la solution varie nécessairement avec la composition des fontes traitées, nous dirons qu'avec des fontes fortement siliceuses et pauvres en manganèse l'addition est indispensable ; si au contraire on traite, comme en Styrie et en Suède, des fontes au bois dont la teneur en silicium atteint rarement 2 pour 100 et qui sont manganésifères, l'addition peut être supprimée sans inconveniit. Il en est de même à Seraing, où l'on traite les minerais riches et purs de Bilbao, qui donnent à l'opération Bessemer une allure très régulière.

Lorsque l'addition finale est employée, la proportion dans laquelle elle doit être faite dépend évidemment de sa propre composition et du degré d'affinage auquel le métal fondu a dû être amené. On arrivera facilement dans la pratique, en s'aidant des analyses de l'acier obtenu et de la scorie qui l'accompagne, à déterminer la quantité nécessaire, qui est ordinairement comprise pour les spiegels ordinaires à 10 pour 100 de manganèse, entre 6 et 10 pour 100 du poids initial de la fonte. Lorsque l'on emploie du ferro-manganèse, le poids nécessaire varie naturellement en raison inverse de la richesse en manganèse. Dans tous les cas, ce métal se partage entre la scorie et l'acier, auquel il communique les propriétés étudiées dans les premiers chapitres. Quant à la scorie, elle peut, là où le manganèse est cher et si les minerais ne sont pas eux-mêmes trop siliceux, être repassée dans le haut fourneau.

C'est ici que se place naturellement l'indication des divers essais faits pour introduire dans le bain métallique, au cours de l'opération, des réactifs supposés avantageux. Tunner avait pensé remédier au défaut de chaleur dans les opérations froides en injectant avec le vent du poussier de charbon de bois ; cela était facile en posant sur la conduite de vent une sorte de grand entonnoir fermé par un robinet ; en ouvrant ce robinet de temps en temps on déterminait l'entraînement du poussier de charbon. La flamme sortant du col de la cornue s'animait aussitôt, mais l'allure générale de l'opération ne se montrait pas influencée. L'affinage à l'air chaud tenté à Zeltweg, usine située également en Styrie, donnait bien une augmentation de température mais rendait difficile le maniement de l'appareil, de sorte que ces deux essais furent promptement abandonnés. A Reschitzta les résultats ne furent pas meilleurs. L'introduction de la vapeur d'eau, d'oxygène pur, d'hydrocarbures, tentée par Bessemer lui-même en vue d'opérer la déphosphoration, n'ont pas eu de meilleurs résultats. Il fallait, pour résoudre cet important problème, des modifications plus complètes dans la construction de l'appareil et dans son mode d'emploi.

Lorsqu'on se trouve au contraire en présence d'une opération chaude, ou a recours à une addition très simple et qui peut être utile en certains cas ; c'est celle des divers déchets d'acières désignés dans les usines sous le nom de *scraps*, et lorsque ceux-ci sont insuffisants, on emploie concurremment avec eux des bouts de rails, qu'on peut refondre ainsi sans dépense de combustible, lorsqu'on n'a pas

pour eux de meilleur emploi. On peut dans les opérations chaudes refondre ainsi plusieurs centaines de kilogrammes de déchets, et souvent même leur quantité n'est limitée que par la difficulté matérielle de leur introduction dans le col de l'appareil. Quelques ingénieurs considèrent toutefois cette pratique comme n'étant pas très favorable à l'homogénéité du métal obtenu. Une charge Bessemer est, nous l'avons déjà dit, une opération très délicate et dans laquelle il faut, autant que possible, éviter d'introduire des imprévus.

Coulée de l'acier. — Qu'on ait procédé avec ou sans addition, nous en sommes venus au moment de la coulée du métal. Quelle que soit la forme qu'il recevra après sa solidification, l'acier Bessemer n'est jamais versé directement dans ses récipients définitifs, mais est reçu d'abord dans une vaste *poche* ou *chaudron* qui le répartit ensuite entre les moules ou lingotières. Nous verrons au chapitre suivant quelles ingénieuses dispositions Bessemer a su employer pour la manœuvre rapide et la vidange de cette poche qui renferme souvent plus de 10 000 kilogrammes d'un métal brûlant. Son emploi a pour but de permettre une séparation aussi complète que possible du métal et de la scorie, séparation que la grande différence de densité rend du reste facile, et de laisser aussi l'acier, tout bouillonnant au sortir de la cornue, se calmer avant d'être introduit dans les lingotières. Il faut pour que le remplissage de celles-ci se fasse d'une manière satisfaisante, un jet régulier, ininterrompu et, malgré toutes les précautions prises, la coulée de l'acier est toujours une opération difficile. Tantôt il se produit dans le lingot un retasslement qui rend impropre toute la partie supérieure ; tantôt au contraire le métal se fait jour avec une force inattendue entre les parois de la lingotière et les bouchons de toute sorte avec lesquels on cherche à fermer son orifice. Le lingot présente alors des vides intérieurs correspondant à ces éruptions du métal, et son emploi ménage souvent de fâcheuses surprises.

L'examen de la scorie lors de la coulée peut, aussi bien que celui de l'acier, donner lieu à des observations utiles sur la qualité du métal. Lorsque la scorie, bien fluide, forme dans la poche, au-dessus du métal en fusion, une nappe tranquille qui se refroidit lentement en formant une surface convexe régulière traversée par de petites flammes bleues, on peut en conclure que l'opération a été conduite d'une manière normale ; lorsque au contraire cette scorie courte et réfractaire s'écoule avec peine de l'orifice de la cornue, et se solidifie presque aussitôt, on peut concevoir des craintes pour la qualité du métal qui l'accompagne. C'est l'étude constante et minutieuse de tous ces phénomènes qui forme un personnel expérimenté.

Le meilleur moyen de remédier aux difficultés que présente la coulée est d'avoir un acier de composition chimique convenable ; en pareil cas il se coule bien et la conduite de l'atelier est facile. Lorsqu'on se trouve en présence d'acières douteux, on a cherché à lutter contre les embarras signalés ci-dessus en laissant un temps assez long s'écouler entre la fin du soufflage et le remplissage de la poche ; quelques ingénieurs recommandent en pareil cas une attente de 20 minutes et même d'une demi-heure ; mais on s'expose alors, surtout avec des aciers doux et par suite plus disposés à se solidifier promptement que les aciers plus carburés, à voir une partie du métal se figer dans la poche ; le même inconvénient se produit quand on coule avec des jets trop petits ; la coulée est alors plus facile, mais elle devient intermi-

nable, et il reste une carcasse métallique qui augmente sensiblement le déchet de l'opération. Nous verrons en étudiant plus spécialement le dispositif de la coulée entre quelles limites il convient de se tenir pour se trouver en présence du minimum de difficultés.

Tout ce qu'on a vu de l'opération Bessemer fait pressentir qu'elle doit être accompagnée d'un déchet assez notable. Ce déchet résulte d'une part des combustions qui sont l'essence même du procédé, et se traduisent par la production de gaz et la formation d'une scorie. Celui-là est inévitable; l'autre provient des projections, des fonds de poche, des gouttes de métal, bavures, etc., qui se produisent presque toujours lors du passage d'une lingotière à une autre, quel que soit le soin apporté dans la coulée; ces *scraps* qui en résultent ne sont du reste pas sans valeur et repassent dans les divers appareils de fabrication (haut fourneau, four Martin, cornue elle-même).

Quant au déchet de feu, il varie nécessairement avec la composition des fontes. Avec des fontes au bois ne contenant juste que la quantité d'éléments combustibles nécessaires, il ne dépasse pas 10 pour 100; avec des fontes siliceuses, il s'élève forcément et peut atteindre 15 et même 18 pour 100. On peut admettre que 12 à 15 pour 100 de déchet total correspond à la moyenne obtenue dans les ateliers employant le procédé acide dont l'étude a été faite dans ce chapitre.

CHAPITRE X

FABRICATION DE L'ACIER BESSEMER (SUITE).

Dispositions des ateliers et description des appareils.

L'opération Bessemer comporte, on l'a vu, trois manipulations principales : 1^o l'introduction dans la cornue de la fonte à traiter, soit qu'elle provienne directement du haut fourneau, soit qu'elle ait été refondue dans l'atelier même ; 2^o l'affinage, qui se fait tout entier par l'action du vent et n'exige pas d'autre travail que celui de la machine soufflante ; 3^o la coulée de l'acier fondu, d'abord dans le chaudron, puis dans les lingotières.

A ces trois manutentions correspondent trois étages de l'atelier. L'étage intermédiaire celui qui supporte les cornues, où se font le démoulage et l'enlèvement des lingots, où l'équipage de l'atelier a le plus à faire, est donné presque toujours par le niveau naturel du sol ; l'étage supérieur, nécessaire pour le chargement de la cornue, est constitué par une plate-forme desservie par des monte-charges et de puissants ascenseurs. Quant à l'étage inférieur, qui forme la fosse de coulée dans laquelle se trouvent placées les lingotières, il est, comme le nom même l'indique, le plus souvent en déblai, et l'excavation doit être d'autant plus profonde qu'on veut couler des lingots de plus fortes dimensions.

Les figures 16 et 17 montrent les dispositions principales d'un atelier construit d'après le système américain étudié par l'ingénieur A. Holley, et qui permet de réaliser la plus forte production avec le minimum de main-d'œuvre. Les deux convertisseurs sont placés l'un à côté de l'autre, leur axe de rotation sur le prolongement l'un de l'autre suivant une corde de la fosse circulaire de coulée, et à 5^m,60 au-dessus du sol de l'atelier. Ils peuvent se mouvoir autour d'un axe horizontal formé de deux tourillons faisant corps avec l'armature extérieure en fer et en fonte. L'un de ces tourillons sert de conduite de vent ; l'autre porte un pignon mû à l'aide d'une crémaillère qui se trouve dans le prolongement d'un piston mis en mouvement par la pression hydraulique. L'installation des cornues est complétée par des cheminées en tôle garnies de matériaux réfractaires qui permettent aux flammes et aux fumées de s'échapper.

La fonte est fournie soit directement par les hauts fourneaux, soit par des cubilots. Dans le premier cas elle est coulée dans une poche amenée par des voies roulantes, jusqu'à l'un des élévateurs hydrauliques EEE, qui la monte au niveau de la plate-forme de chargement, située à 9^m,50 au-dessus du sol de l'atelier. La poche

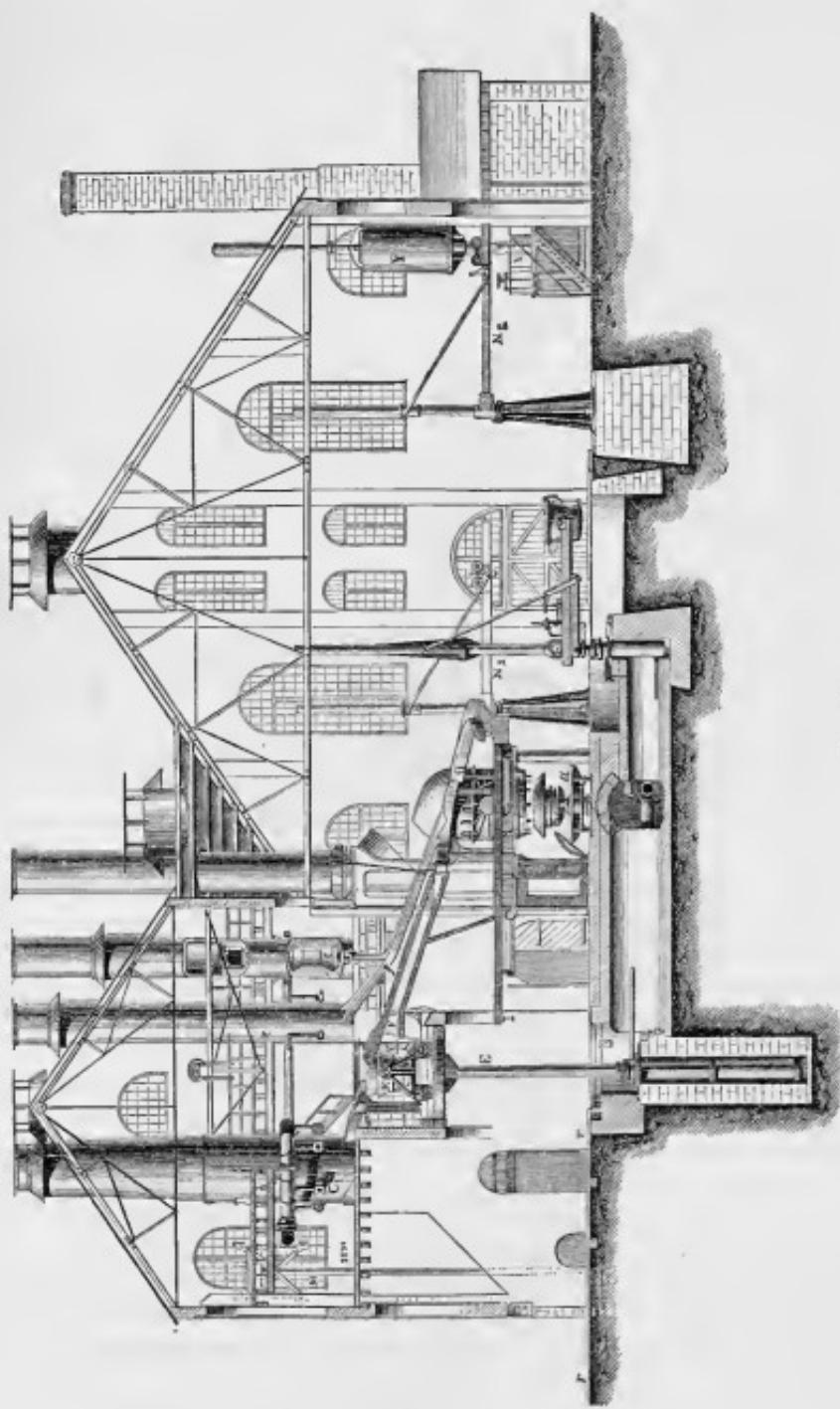


Fig. 46.

est alors inclinée peu à peu et la fonte coule par un système de rigoles plus ou moins compliqués dans l'une ou l'autre des deux cornues.

Si au contraire l'atelier doit marcher en seconde fusion, ou se sert des trois grands cubilots $C C_2 C_3$ représentés sur le plan suivant des coupes différentes, et la fonte s'en écoule directement dans la cornue en passant de la rigole supérieure

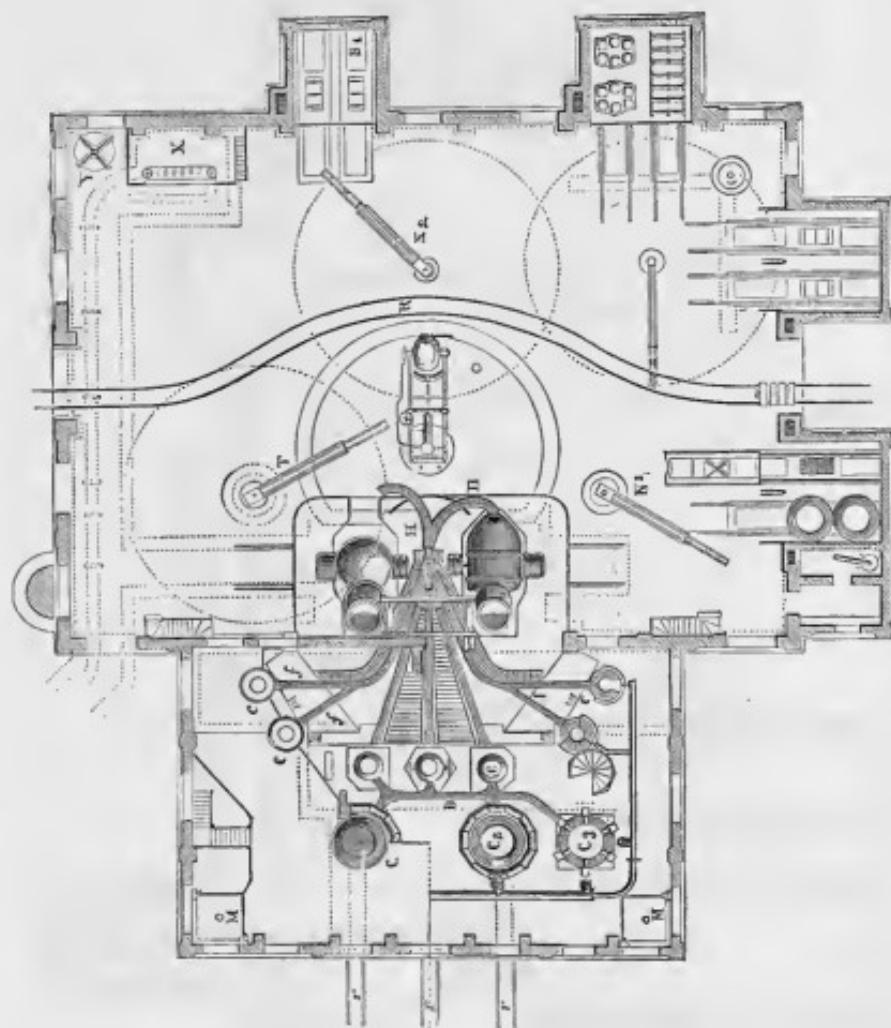


Fig. 47.

dans la rigole inférieure amenée au-dessous de la première après abaissement du plateau de l'élévateur ; en outre quatre petits cubilots *cccc*, installés deux à deux de part et d'autre des grands et au même niveau, fournissent la fonte nécessaire aux additions finales, au moyen des rigoles *ffff*.

Les 7 cubilots sont établis sur la plate-forme de 9^m,50 de hauteur; leur angle arrière

est au-dessus d'un second plancher établi à 15^m.50 du sol de l'atelier, et desservi également par des ascenseurs qui amènent les fontes et les cokes nécessaires à la fusion.

C'est là à coup sûr un des ensembles les plus complets qu'on puisse voir. Les dispositions adoptées pour mettre le démoulage en rapport avec la puissance des moyens de chargement ne sont pas moins intéressantes ; la fosse circulaire de coulée, qui en constitue la partie la plus importante, a un diamètre de 9^m.50 et une profondeur de 1^m.70. En son centre est située la grue à pivot fixe qui permet, par un mouvement circulaire, d'amener la poche de coulée sous chacune des cornues, puis au-dessus des lingotières où elle doit se vider. Cette grue peut en même temps s'élever et s'abaisser de manière à permettre à la poche de suivre le mouvement de la cornue dans son revirement, et de se placer à une hauteur convenable par rapport aux lingotières dont la hauteur peut varier. Trois autres grues hydrauliques N₁N₂N₃, également animées d'un double mouvement d'ascension et de rotation, desservent la fosse de coulée et permettent de charger rapidement les lingots, encore rouges, sur les wagonnets du chemin de fer qui les conduisent à destination. D'autres grues servent au transport des lingotières, des moules divers et des fonds de cornue depuis leurs magasins ou leurs étuves jusqu'au lieu de leur emploi. La multiplication de ces engins mécaniques permet, on le voit, d'arriver avec une main-d'œuvre insignifiante aux chiffres étonnans de production que nous ferons connaître lorsque nous étudierons le roulement des ateliers.

La pression hydraulique joue comme on l'a vu un rôle important dans l'installation d'une usine Bessemer : elle assure les mouvements des cornues, de la poche de coulée et de nombreuses grues de démoulage et de chargement. Ces mouvements lents, mais sûrs et puissants, se prêtent bien en effet à ces opérations délicates, et Bessemer doit à son emploi une bonne part du succès pratique de son invention. Nous ne saurions entrer ici dans l'examen détaillé des appareils qui la produisent, l'immagassent et la distribuent. Les pompes et les accumulateurs sont une annexe indispensable des nouvelles aciéries, et réunis aux machines soufflantes, ces appareils forment dans les établissements récemment construits un des plus beaux ensembles mécaniques que l'ingénieur métallurgiste ait à diriger.

Il est rare que toutes ces machines puissent être dans le voisinage immédiat des cornues qu'elles doivent actionner ; leur éloignement relatif est même souvent préférable, car elles se trouvent ainsi soustraites aux poussières de toutes sortes qui remplissent l'air de l'atelier ; mais il faut alors que ce dernier possède tous les moyens de disposer des forces qu'elles lui envoient. Il existe donc en vue des cornues un emplacement spécial où se trouvent réunis les leviers de commande des différents appareils hydrauliques ainsi que de l'admission du vent (lettre X, figures 16 et 17). C'est là qu'entouré des divers manomètres et du spectroscope, se tient pendant la charge le chef d'atelier, dirigeant les derniers préparatifs de la coulée et attendant le moment où sa main, renversant la cornue, lui fera lancer cette puissante gerbe d'étincelles qui fait d'une opération Bessemer un spectacle si souvent admiré. C'est au *banc de manœuvre* que sont venus s'asseoir pendant de longues heures, à la suite d'Henri Bessemer, cette troupe savante de professeurs, d'ingénieurs et de grands industriels dont le nom s'est déjà rencontré sous notre plume et qui tous

ont cherché dans l'étude des progrès déjà réalisés, le secret des nouveaux succès à conquérir.

Reprenons maintenant l'étude détaillée des divers appareils de fabrication, en commençant par le plus important, la cornue. Les figures 16 et 17 ont permis de se faire une idée de sa forme; il nous reste à faire connaître les détails de sa construction et de ses principales dimensions.

Cornue. — La cornue Bessemer qui, vuc en service, paraît former un ensemble inséparable, est composée de trois parties distinctes, *le chapeau*, *la cuve* et *la boîte à vent*. Le chapeau se termine lui-même par le col incliné et rétréci qui a fait évidemment donner à l'appareil le nom qu'il porte. Le chapeau et la cuve se composent d'une armature extérieure en forte tôle rivée, et d'un garnissage dont l'épaisseur varie de 0^m,25 à 0^m,50. Ce garnissage est fait en pisé d'argile réfractaire que l'on dame fortement entre la chemise en tôle et une série de manchons superposés qui représentent exactement le vide intérieur de la cornue lorsque la garniture aura été faite. Pour faire ce garnissage, le chapeau est enlevé par une forte grue et renversé, tandis que la partie inférieure peut être laissée sur ses tourillons et garnie sur place. La cornue fraîchement garnie doit être bien séchée et chauffée progressivement avant d'être mise en service.

La boîte à vent est la partie délicate de la cornue: située à la base de la cuve, reliée à son armature par des boulons à clavettes faciles à manœuvrer, elle sert de réservoir au vent forcé qui lui est amené du tourillon creux, et le transmet au bain de fonte par l'intermédiaire des tuyères. Ces tuyères sont le point faible de l'appareil; refroidies d'un côté par le courant d'air, chauffées et frappées de l'autre par le métal en ébullition, elles se désagrègent et fondent promptement. Chaque tuyère se compose d'un tronc de cône moulé en terre réfractaire, et percé d'une série de conduits cylindriques de 0^m,007 à 0^m,009 de diamètre; ces tuyères, au nombre de 8 à 12, réunies en une seule masse au moyen d'un pisé réfractaire analogue à celui qui forme le garnissage de la cornue, en constituent le fond. Lorsqu'elles sont usées, on les enlève à coups de masse ou de pointe-rolle, et on les remplace par des tuyères neuves en luttant de nouveau les joints avec de la terre réfractaire; puis, lorsque le fond tout entier, dont l'épaisseur initiale varie de 0^m,45 à 0^m,60, est lui-même assez usé pour mettre en danger la plaque de fonte qui le supporte, on l'enlève en entier et on le remplace par un autre préparé d'avance et séché à l'étuve. La figure 16 représente la cornue au moment où elle est soumise à cette opération.

La capacité des cornues actuellement en service varie entre de larges limites, et pour elles comme pour la plupart des produits de l'industrie humaine, les dimensions ont été toujours en augmentant. Dans les premières usines construites, la charge dépassait rarement 5 à 5 tonnes; elle s'est élevée successivement à 8, 10, 12 tonnes, et il en existe de 15 tonnes aujourd'hui. Le profil intérieur de la cornue de Reschitzka a pour une capacité de 8 tonnes 0^m,95 à la base, 1^m,75 au ventre, 0^m,45 au col; la hauteur de la cornue est de 5 mètres et l'épaisseur du garnissage est de 22 centimètres au col et de 0^m,26 au ventre. Le fond est formé de 12 tuyères à 7 trous de 0^m,007 de diamètre; sa hauteur est 45 centimètres.

Poche de coulée. — La poche de coulée est comme la cornue faite en forte tôle

et garnie à l'intérieur d'argile réfractaire mélangée de paille hachée qui facilite son adhérence aux parois. L'épaisseur de ce garnissage, qui n'est que de quelques centimètres le long des parois verticales, va en augmentant en s'approchant du fond, et l'on a soin de garnir celui-ci de telle sorte qu'il présente une inclinaison vers la *coulée*, placée sur un des côtés de la poche. Cette coulée consiste en une brique de forme spéciale sur laquelle vient s'appuyer un tampon en argile réfractaire fixé à l'extrémité d'une tige recourbée enduite de la même matière que la poche elle-même. Cette tige recourbée, qui porte le nom de *quenouille*, vient se raccorder avec une glissière verticale placée à l'extérieur de la poche et manœuvrée par un levier. La figure 18 permet de se faire une idée de cette disposition.

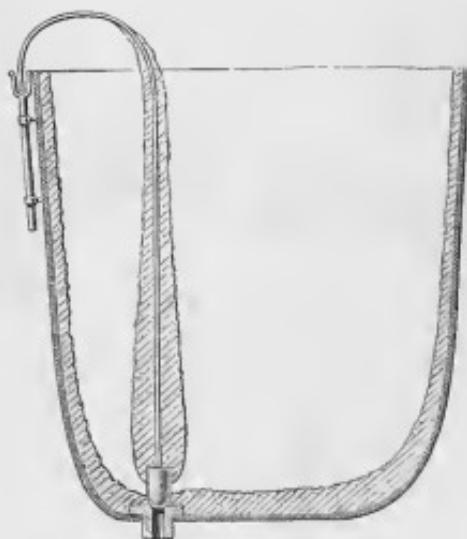


Fig. 18.

La confection régulière des poches et des quenouilles présente pratiquement une grande importance, et les accidents qui résultent des fautes commises à cet égard sont une des difficultés de la mise en marche des ateliers Bessemer. Si le garnissage n'est pas suffisamment réfractaire ou s'il est mal séché, la tôle se trouve promptement à nu et se perce, en laissant le métal s'écouler d'une façon souvent dangereuse. Si la quenouille n'est pas bien posée, la fermeture n'est pas hermétique et le bouchage pour le passage d'une lingotière à l'autre devient impossible. Avec des aciers très chauds le trou de coulée, dont les dispositions de détails sont indiquées par les figures 19 et 20, se ronge, s'agrandit, et le bouchage devient difficile quelles que soient les précautions prises. Quelquefois au contraire la quenouille se défait, le bouchon reste collé sur son siège; on cherche alors à le briser en introduisant par le bas un outil ayant la forme indiquée par la figure 21, et en le frappant en dessous à coups de masse. On réussit ainsi à achever la coulée, mais le jet coule à plein dans le passage d'une lingotière à l'autre, et la qualité des lingots se ressent forcément de ce désordre. Si les efforts pour déboucher la poche

demeurent stériles, il ne reste plus qu'à la basculer et à verser par le bec, dont elle est ordinairement munie, son contenu dans une grosse lingotière de secours qui se rencontre généralement dans la fosse de l'atelier. Si enfin cette dernière manœuvre est impossible ou trop longue à réaliser, l'acier, trop pâteux pour être coulé de cette manière, se fige en masse dans la poche et forme un de ces loups qu'on rencontre dans les coins reculés des cours d'usines, jusqu'au moment où une disette de matières premières conduit à utiliser tant bien que mal ce déchet embarrassant. Ajoutons que la production des loups, fréquente dans les ateliers encore jeunes, devient une rareté avec un personnel bien exercé.

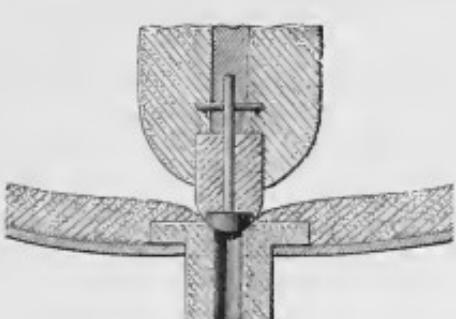


Fig. 19.

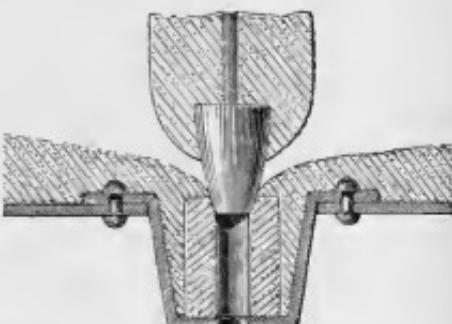


Fig. 20.



Fig. 21.

Lingotières. — On désigne sous ce nom les vases en fonte, de forme ordinairement simple, dans lesquels l'acier liquide vient se solidifier. La forme la plus ordinaire des lingots est celle d'un tronc de pyramide ou d'un tronc de cône. Il va sans dire que l'arête ou la génératrice de ces solides n'est inclinée qu'autant que cela est nécessaire pour permettre le démoulage. La base du prisme est carrée dans les lingots pour rails et pour essieux, rectangulaire dans les lingots pour tôles, octogonale dans les gros lingots destinés au travail de la forge. Le tronc de cône s'emploie pour les lingots destinés à la fabrication des bandages. Avec les progrès de la fabrication des aciers sans souffrance, on peut constater une tendance générale à rapprocher autant que possible la forme du lingot de celle de la pièce achevée. On économise ainsi la main-d'œuvre, mais cela n'est possible qu'avec des matières de choix.

Les lingotières doivent être en fonte grise à grains serrés, de bonne qualité. L'épaisseur de leur paroi varie avec le vide intérieur qu'elles présentent, et est comprise ordinairement entre 6 et 8 centimètres. Elles sont aujourd'hui presque partout d'une seule pièce, mais quelques ateliers avaient essayé de les diviser en deux parties s'emboitant l'une dans l'autre, comme il est indiqué en *b* dans la fig. 25, et maintenues en contact par deux fretttes. Cette disposition facilite évidemment le démoulage, mais elle complique la préparation des lingotières, et est impossible dans les ateliers à forte production.

Les lingotières sont toujours munies, à leur partie supérieure, de deux oreilles *a* dans lesquelles on introduit des crochets reliés par une chaîne au bras horizontal des grues hydrauliques qu'on voit figurer sur le plan général de l'atelier. Le mouvement aseendant de la grue soulève la lingotière et généralement, surtout lorsque celle-ci n'a encore que peu d'usage, le lingot se détache de lui-même et reste debout sur sa base. On l'enlève alors à son tour au moyen de pinces appropriées. Lorsque au contraire la surface interne de la lingotière est déjà un peu rugueuse, le lingot reste adhérent, est enlevé avec elle, et il faut frapper la lingotière de vigoureux coups de masse pour l'en faire tomber. Quelquesfois, lorsqu'on a affaire à un métal très chaud, l'adhérence est telle qu'il faut recourir à de véritables manœuvres de force pour expulser le lingot. On cherche à combattre cette adhérence en enduisant les lingotières de goudron, d'eau de chaux, etc., mais la meilleure manière d'éviter cet inconvénient c'est de les renouveler à temps. Leur usure est du reste assez variable et dépend, comme on l'a vu, de la nature de l'acier. Il arrive quelquefois qu'après quarante opérations une lingotière doit être remplacée, tandis qu'une autre dépassera la centaine. Il suffit d'un jet mal dirigé qui vient entamer la paroi pour faire mettre au rebut une lingotière n'ayant encore fait qu'un petit nombre d'opérations.



Fig. 22.

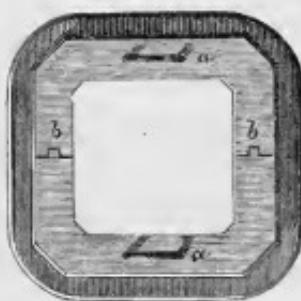


Fig. 25.

La pièce prismatique, également en fonte, sur laquelle repose la lingotière est sujette à des détériorations bien plus fréquentes encore. Certains lingots peuvent avoir jusqu'à 2 mètres de hauteur, et le fond de la poche de coulée doit être au moins à

25 centimètres au-dessus de l'arête supérieure de la lingotière pour permettre de surveiller l'opération. On comprend que le jet d'acier venant frapper d'une semblable hauteur, sous la pression du bain métallique, a bientôt fait de creuser son trou dans le fond sur lequel repose la lingotière, quelle que soit la qualité de la fonte employée.

On a cherché à remédier à cette usure par divers moyens. Dans quelques ateliers on reçoit le métal dans une poche intermédiaire garnie de terre réfractaire et percée d'un trou de coulée analogue à celui de la poche principale. On brise ainsi la violence du jet et l'acier remplit la lingotière plus tranquillement, ce qui favorise aussi l'homogénéité du lingot. La disposition le plus généralement adoptée consiste à placer dans le fond une brique réfractaire sur laquelle le jet vient frapper et qui résiste bien mieux à l'usure. Cette brique est souvent munie de canaux rayonnants, qui permettent de couler en source et de remplir plusieurs lingotières à la fois. Cette disposition, très avantageuse pour la coulée des petits lingots, permet de diminuer le nombre des bouchages; combinée avec l'emploi de la poche intermédiaire, elle nous paraît réaliser pour la coulée les meilleures conditions.

Machines soufflantes.— Le vent est, comme on l'a vu, l'élément vital de l'atelier, et les machines destinées à le produire doivent être étudiées avec soin. Elles rentrent dans deux types généraux, le type horizontal à deux cylindres conjugués et le type vertical avec un cylindre seulement, auquel on accorde dans ces derniers temps la préférence. Les excellentes indications données par Gruner dans le tome premier de sa *Métallurgie générale* nous dispensent d'entrer ici dans l'examen détaillé des divers organes de ces machines tels que cylindres soufflants, pistons, élapets, portevant, etc. Les ateliers de construction qui se sont le plus distingués dans ce genre sont ceux du Creusot et de Seraing, pour la France et la Belgique, et de Wetter an der Ruhr, en Westphalie (*Bergisch Märkische Maschinenbauanstalt*). La planche 36 de l'*Album de métallurgie* de M. Jordan donne la disposition de la soufflerie du Creusot. Les divers types adoptés successivement par l'usine de Seraing ont été reproduits dans le *Portefeuille* de John Cockerill, publié sous la direction de ce grand établissement. Le type adopté par les ateliers de Wetter an der Ruhr est moins connu. On en a installé en 1881, à Reschitz, un beau spécimen consistant en une machine à deux cylindres horizontaux conjugués. Le diamètre des cylindres à vapeur et à vent (1^m,53 et 1^m,57), ainsi que leur course commune (1^m,57), montrent qu'on a tenu à disposer d'un des appareils les plus puissants qui existent jusque aujourd'hui. La machine a été calculée pour faire 25 à 50 tours par minute en comprimant l'air à 2 atmosphères, et elle développe dans ces conditions une force effective de 1000 chevaux. L'économie dans la dépense de vapeur, nécessaire pour des machines aussi puissantes, est assurée par l'emploi d'un condenseur du système Horn et par une détente considérable.

La question des chaudières est en quelque sorte inséparable de celle de toute machine à vapeur. Ce serait trop nous écarter de notre sujet que d'indiquer ici les types de chaudières les plus recherchés aujourd'hui. Il convient toutefois de rappeler que l'opération Bessemer étant, par sa nature même, intermittente, des chaudières pouvant se mettre vite en pression et donner beaucoup de vapeur pendant un temps limité, c'est-à-dire des chaudières tubulaires à haute pression, se recommandent particulièrement.

CHAPITRE XI

ROULEMENT DES ATELIERS BESSEMER ET ÉTUDE ÉCONOMIQUE DE LA FABRICATION

Organisation du personnel. — Production. — Prix de revient.

L'installation d'un atelier Bessemer est aujourd'hui une tâche aisée. De nombreux ateliers de construction sont prêts à se charger non seulement de la fourniture des machines, mais encore de tous les appareils secondaires de la fabrication. On peut, pour une production donnée, commander un atelier Bessemer comme on commanderait une simple lingotière, mais la mise en marche est, comme la description de l'opération l'a montré, chose plus délicate, et c'est par les précautions qu'elle exige que ce chapitre sera commencé.

Si le personnel de l'atelier est remarquablement peu nombreux par rapport au tonnage produit, il doit par contre se composer d'ouvriers de choix, non seulement habiles dans le travail qui leur est confié, mais ayant l'intelligence et le sang-froid nécessaires pour agir avec promptitude et initiative, lors des accidents qui peuvent survenir dans la marche des appareils. Il faut avant tout un *chef d'atelier* tel que nous avons eu l'occasion de le décrire. Il est assisté d'un ou de plusieurs *faiseurs de poche*, responsables de leur travail et chargés aussi, lorsque les circonstances l'exigent, de la réfection et de la réparation des cornues. Les *démouleurs*, qui doivent être au moins quatre et dont le nombre augmente avec la fréquence des opérations, s'occupent spécialement de poser exactement les lingotières, de veiller à ce qu'elles soient toujours en bon état, et procèdent au démoulage dès que l'opération est terminée. Si l'atelier marche en seconde fusion, un certain nombre de *fondeurs* sont attachés aux cubilots ou aux fours à réverbère qui livrent la fonte à la cornue. Enfin les machines soufflantes ou hydrauliques sont confiées à des *machinistes sûrs*, placés également sous les ordres du chef d'atelier. On arrive ainsi à un maximum de 25 à 50 ouvriers pour une production qui peut aisément atteindre 150 tonnes par douze heures. Lorsque l'atelier marche jour et nuit, ce nombre d'hommes doit évidemment être doublé pour faire face au service de la journée entière.

Au moment du chargement de la fonte tout le personnel de l'atelier, sauf les machinistes, doit prendre part à cette opération; il en est de même lors de la coulée. Le chef d'atelier se réserve le plus souvent de tenir le levier de bouchage de la poche, qui doit être manœuvré d'une main sûre; il choisit ordinairement parmi les faiseurs de poche un ouvrier intelligent qui puisse le remplacer dans ce travail, lorsque une circonstance imprévue l'oblige à vaquer à d'autres soins.

On sait que la fonte, et surtout l'acier fondu, tendent promptement à revenir à leur état normal de solidification. Il importe donc que tous les récipients par lesquels ils passent, poche à fonte, convertisseur, poche à acier, soient maintenus à une température aussi élevée que possible. On y arrive pour la cornue par le fait des opérations mêmes lorsqu'elles se succèdent à des intervalles assez rapprochés; sinon on est obligé d'entretenir dans le fond une couche de coke que l'on fait brûler en faisant passer du vent, mais à une pression de quelques centimètres seulement. On chauffe les poches en les renversant sur de petits foyers circulaires à vent soufflé, mais ce chauffage doit toujours être précédé d'un bon séchage de la garniture réfractaire, qui sans cela se détacherait au moment où la poche est retournée.

Les lingotières exigent aussi, lors de la mise ou de la remise en marche de l'atelier, quelques soins spéciaux. Dans le travail courant on a plutôt à les refroidir qu'à les chauffer, mais elles ne doivent pas être tout à fait froides lors de la première opération, car elles pourraient alors se fendre; l'usure des lingotières n'est point un facteur négligeable du prix de revient, et rien de ce qui peut le réduire ne doit être omis.

Quoi qu'il en soit de ces soins accessoires, ce prix de revient dépend avant tout des deux éléments en présence desquels on se trouve dans toute opération industrielle, la *quantité* produite et la *qualité* du produit. Cette dernière ne se fait pas sentir directement dans le prix de revient des lingots, mais les conséquences d'une mauvaise fabrication n'en sont que plus fâcheuses dans les prix de revient des produits finis, par suite des rebuts qu'elle occasionne.

Pour obtenir la quantité on a été conduit à augmenter le volume des cornues, et, par une heureuse coïncidence, la qualité n'a fait qu'y gagner. On a vu les cornues passer successivement de 5 à 15 tonnes, et rien ne prouve que ce dernier chiffre soit la limite à laquelle on s'arrêtera. Il n'a pas été difficile de mettre l'outillage mécanique en rapport avec ces dimensions, et les figures 16 et 17 ont montré à quelle multiplicité d'engins on est arrivé: on peut par vingt-quatre heures, même en faisant usage de cornues de fortes dimensions, atteindre jusqu'à trente opérations.

Les conditions à remplir pour arriver à une qualité convenable ont été longuement étudiées dans les chapitres qui précèdent. Il est un point toutefois sur lequel les opinions diffèrent encore aujourd'hui. Bien que l'emploi de la fonte provenant directement du haut fourneau ait été considéré comme un progrès incontestable, quelques métallurgistes recommandent la marche en seconde fusion comme une condition à peu près nécessaire d'une qualité constante et irréprochable. Il est certain qu'il est difficile, pour ne pas dire impossible, de maintenir un haut fourneau dans une allure absolument invariable, surtout lorsqu'on y emploie plusieurs sortes de minéraux; mais parce que l'allure du haut fourneau change, la qualité de l'acier obtenu doit-elle aussi changer? nous ne le croyons pas. La marche en première fusion exige plus de flexibilité de la part des ingénieurs; elle leur impose une surveillance plus attentive, mais elle a l'avantage d'être bien moins coûteuse, car la refonte, avec le déchet qui l'accompagne, ne saurait être évaluée à moins de 8 ou 10 francs par tonne d'acier produit; de plus ce traitement intermédiaire, en mettant le plus souvent dans le cubilot la fonte en contact avec un combustible qui contient des cendres sulfureuses, ne paraît pas devoir améliorer

sa qualité, et cet inconvénient compense l'avantage de pouvoir choisir les gueusets et de les assortir d'une manière régulière.

Du reste, lorsqu'on dispose d'un certain nombre de hauts fourneaux, on peut pour chaque opération prendre la fonte à plusieurs d'entre eux, et opérer ainsi avec la fonte liquide un mélange à peu près constant. Nous considérons donc la marche en première fusion comme un élément de succès pour les usines qui peuvent l'employer.

En pareil cas Gruner indique dans son *Traité de métallurgie*, comme prix de revient de l'opération Bessemer, un chiffre de 25 à 30 francs. Nous possédons pour notre part les prix de revient d'un grand nombre d'usines, mais nous savons avec quelle discréption de semblables renseignements doivent être employés; il nous a, par contre, été possible, en prenant la moyenne de ces divers chiffres, d'arriver à une sorte de prix de revient théorique dont l'examen peut encore présenter quelque utilité.

Ce calcul suppose que le prix moyen de la fonte initiale et de l'addition finale soit de 60 francs, et celui de la houille de 12 francs; que l'atelier possède des cornues de huit tonnes, avec un roulement moyen de quinze opérations par vingt-quatre heures, enfin que les salaires soient calculés de telle sorte que les ouvriers les moins payés de l'atelier arrivent à une journée de 4 à 5 francs par jour. Dans ces conditions le prix de revient s'établit comme il suit:

Salaires.	5 ^r ,00
Combustible pour le chauffage des appareils.	2 20
Matériaux réfractaires.	1 40
Entretien et réparations de l'atelier.	2 00
Marchandises de magasin.	1 00
Force motrice (salaires et combustible).	5 50
Frais généraux de l'atelier.	2 00
	<hr/>
	17 10
12 pour 100 de déchet de la fonte	7 20
	<hr/>
Total.	24 50

Il est à remarquer que le prix de revient ne comprend pas les frais généraux de l'entreprise ni l'intérêt et l'amortissement du capital qui y est engagé. Ce sont là des éléments très variables et qui ne présenteraient ici aucun intérêt.

Nous voudrions terminer ce qui concerne le procédé Bessemer en faisant connaître dans un exposé rapide les principales usines du continent qui se sont adonnées à sa fabrication. Pour ne procéder qu'à grands traits et en nous excusant d'avance d'omissions inévitables, nous voyons en France le groupe de la Loire, où les usines de *Terre-Noire*, de *Saint-Chamond*, de *Saint-Étienne*, luttent avec courage contre une situation difficile, le groupe du centre où le *Creusot* se place au premier rang, accompagné des aciéries de date déjà ancienne appartenant aux sociétés de *Châtillon* et *Commentry* et de *Fourchambault*. Plus au sud nous trouvons les établissements de *Beaucaire* et de *Bessèges*, dépendant des compagnies déjà nommées et traitant avec les charbons du bassin du Gard les minerais d'Afrique, dont Marseille est le grand port de débarquement.

En remontant vers le nord, en suivant le littoral, se rencontrent les usines du *Boucau*, près de Bayonne, et celle de *Saint-Nazaire*. Le groupe du nord présente à son tour en première ligne les usines d'*Isbergue*, de *Denain*, de *Valenciennes*, qui, comme les précédentes, demandent aux riches gisements de Bilbao leurs excellents minerais. Comme on le voit, il n'est aucune région de notre territoire sur laquelle la fabrication de l'acier Bessemer ne se soit établie, et celle du Nord et de l'Est a vu, à la suite de la déphosphoration, de nouvelles usines y prendre un rapide essor.

La Belgique possède à *Seraing* un établissement de premier ordre, et les aciéries d'*Angleur*, situées dans le voisinage, suffisent avec lui à couvrir tous les besoins de cet industrieux pays et à lui assurer encore une exportation notable.

L'Allemagne est devenue, pour la fabrication de l'acier Bessemer, la rivale de l'Angleterre, qu'elle menace sur tous ses marchés. Il n'existe pas actuellement un plus beau bassin houiller que celui de la Ruhr; aussi les grandes usines s'y sont-elles accumulées. *Ruhrort*, *Oberhausen*, *Essen*, *Bochum*, *Härde*, *Dortmund*, autant de centres de grosse production sidérurgique; *Osnabrück* possède depuis longtemps de grandes aciéries dont on parle peu eu égard à leurs puissantes voisines. En Bavière la *Machhütte*, en Saxe la *Königin Marienhütte*, en Silésie les grands établissements de *Königshütte* et de *Borsigwerk*, desservent tous les besoins des contrées est de l'empire et écoulement en Roumanie et en Russie le trop-plein de leur production. La déphosphoration a permis à la plupart de ces usines de faire un nouveau pas en avant.

L'Autriche-Hongrie est un pays riche en bons minerais. Les Alpes styriennes et carinthiennes d'une part, les Carpates de l'autre, renferment de puissants gisements. On y trouve cependant peu d'aciéries dont la production soit comparable à celles des usines allemandes. Nous avons déjà eu l'occasion de mentionner celles de *Reschitz* et de *Neuberg*. Il convient de citer à côté d'elles celles de *Witkowitz*, de *Kladno* et de *Tepliz* que nous retrouverons en parlant de la déphosphoration.

En Russie la fabrication de l'acier Bessemer s'est développée dans l'Oural aux usines de *Nijné-Taguilsk* appartenant au prince Demidoff. En Espagne les gisements de Bilbao ont vu bientôt s'établir près d'eux des aciéries qui menacent de fermer entièrement les portes de ce royaume aux importations étrangères. L'Italie n'a pas voulu rester en arrière de ce mouvement et a fait dans ces dernières années de grands efforts pour créer une métallurgie nationale, et c'est ainsi que l'accroissement général de la production a provoqué une crise dont les conséquences pèsent lourdement sur l'industrie qui nous occupe. La déphosphoration, en permettant la création de nouvelles usines, y a aussi contribué.

CHAPITRE XII

MODIFICATIONS APPORTÉES DANS LE PROCÉDÉ BESSEMER PAR LA DÉPHOSPHORATION

Principe de l'opération. — Nature et analyses des fontes employées. — Modification des appareils.
Étude économique de la fabrication.

Principe de l'opération. — On a eu plusieurs fois l'occasion de constater : 1^o que le phosphore renfermé dans les minerais n'était éliminé ni dans le haut fourneau ni dans la cornue Bessemer ; 2^o qu'une teneur en phosphore dépassant 0,45 pour 100 rendait l'acier obtenu impropre à la plupart des usages industriels, quelle que fût d'ailleurs sa composition. Ce double fait laissait inutilisable en France, en Belgique, en Angleterre, en Allemagne, une énorme quantité de minerais remarquables par leur prix de revient extrêmement bas et constituant des gîtes d'une étendue bien supérieure à celle des minerais en roche et en amas, livrés jusqu'alors à l'exploitation.

Toutefois ce n'était point une impossibilité théorique, mais plutôt une série de difficultés pratiques qui s'opposait à l'emploi des minerais phosphoreux. Gruner, dans son traité de métallurgie déjà si souvent cité, indiquait que le phosphore pourrait être éliminé au moins partiellement dans les aciers en fusion, s'ils se trouvaient en présence d'une scorie extrabasique ; la difficulté était d'obtenir cette scorie au contact de garnissages réfractaires dans lesquels l'argile, c'est-à-dire une matière où prédomine l'acide silicique, jouait jusque alors le rôle le plus important.

Ces indications étaient restées sans résultats industriels jusqu'en 1878, époque à laquelle deux chimistes anglais, MM. Thomas et Gilchrist, communiquèrent au Congrès de l'Iron and Steel Institut, tenu à Paris pendant l'Exposition universelle, les résultats des essais poursuivis par eux pendant deux ans dans les usines de Bleanavon et de Dowlais. Ces essais les avaient conduits à résumer, dans les trois faits suivants, l'ensemble des modifications nécessaires pour éliminer le phosphore dans la cornue Bessemer : 1^o *Emploi d'un garnissage en briques de dolomie*, substance reconnue la plus avantageuse, aussi bien sous le rapport de la résistance à la désagrégation qu'au point de vue de la composition de la scorie basique ; 2^o *Additions considérables de chaux éteinte* ayant pour but de maintenir la scorie très basique pendant toute la durée de l'opération ; 3^o *Sursoufflage* destiné à produire la combustion rapide des restes du phosphore auquel est venue s'ajouter dans quelques usines l'élimination de la plus grande partie de la scorie, résultant de cette combustion.

Nature et analyse des fontes employées. — Ces indications montrent que le procédé Thomas-Gilchrist repose essentiellement sur la substitution du phosphore au silicium comme combustible offert au courant d'air introduit dans l'appareil. Les fontes à rechercher en pareil cas ne devront donc plus être graphiteuses, mais être comprises entre le gris clair et le truité. Le tableau suivant, qui indique la composition chimique de celles qui sont reconnues aujourd'hui comme étant les plus appropriées au nouveau procédé, en fournira la meilleure preuve.

	LORRAINE	BLERDE	ILSEDE	CLEVELAND	WESTPHALIE
Manganèse	0.490	1.44	2.53	0.550	1.431
Carbone combiné . . .	3.120	2.55	2.68	3.520	3.267
Silicium	1.218	0.06	0.41	1.100	0.476
Soufre	0.170	0.08	0.04	0.040	0.062
Phosphore	1.720	1.60	2.30	1.610	2.600

L'examen de ce tableau montre que le total des éléments combustibles est moins élevé pour le procédé basique que pour le procédé acide. On a vu page 77 que dans ce dernier cas il descend rarement au-dessous de 10 pour 100, tandis que le maximum dans les analyses précédentes dépasse à peine 9 pour 100 et est le plus souvent compris entre 5 et 7 pour 100. Il y a évidemment là un double avantage au point de vue du prix de revient de la fonte, qui exige une moindre dépense de combustible dans le haut fourneau, et de la durée de l'opération, laquelle est, comme on l'a vu, en rapport plus ou moins direct avec le poids total des matières à éliminer. Il faut en effet remarquer que quelques-unes de ces matières, comme le manganèse et le fer, qui brûle aussi quoi qu'on fasse, sont d'une combustion facile, tandis que le silicium, bien que son oxydation ait lieu dès le commencement de la charge, et le graphite, quand les fontes en contiennent, ne disparaissent qu'avec lenteur et difficulté. Or les fontes à déphosphorer ne contiennent que peu de silicium, et pas de graphite ; c'est là un avantage qu'on ne saurait contester.

Comme l'opération acide, l'opération basique peut être divisée en périodes. La première, caractérisée par l'absence de la flamme, correspond comme précédemment à la combustion du silicium, du carbone et d'une petite quantité de fer ; le phosphore et le soufre, plus abondant ici que dans les fontes grises, ne brûlent pas encore ; le spectroscope n'indique rien. Le manganèse et le fer se scorifient pendant toute la durée de l'opération, mais l'oxydation du manganèse marche ici parallèlement à celle du silicium, qui disparaît d'autant plus rapidement, c'est-à-dire en 2 ou 5 minutes pour une fonte en contenant 1 pour 100, en 5 à 6 minutes pour une fonte en contenant 1,25 pour 100, ce qui est déjà une forte teneur dans le cas qui nous occupe. En outre, ce métalloïde est éliminé avant la fin de l'opération, grâce à l'excès de base dans la scorie, tandis que dans les opérations acides, surtout lorsqu'elles sont chaudes, le silicium se rencontre toujours dans le produit final. C'est là le secret de cette extrême malléabilité des aciers déphosphorés qui les fait rechercher de plus en plus pour la fabrication des tôles et des essieux, et

leur permettra de remplacer, pour tous les emplois, les fers de qualité supérieure, le jour où l'on aura dans leur aptitude à se souder la confiance que le manque d'habitude leur fait encore quelquefois refuser.

La seconde période correspond à la combustion du carbone et d'un peu de phosphore, mais le soufre ne brûle pas encore, tandis que le manganèse et le fer continuont à se scorifier lentement. C'est la période de flammes dont la fin se manifeste comme dans le procédé acide.

La troisième période, celle du surouillage, est caractérisée, comme nous l'avons déjà dit, par la combustion rapide du phosphore qui avait déjà commencé à brûler dans la seconde période. En même temps ou brûle beaucoup plus de fer que dans les périodes précédentes ; le manganèse continue à se scorifier et le soufre disparaît. C'est le moment décisif de l'opération basique. La flamme rentre dans le col du convertisseur ; le spectroscope ne donne plus d'indications précises ; c'est donc surtout le coup d'œil du chef d'atelier qui doit ici déterminer l'arrêt. L'abondance du fer dans la scorie lui enlève aussi cette propriété première de changer de couleur avec le degré d'avancement de l'opération. L'examen d'une prise d'essai du métal refroidi peut encore donner une indication saisissable de son état de décarburation, mais ici comme dans le procédé acide la pratique reste le meilleur guide pour arriver, en partant d'une fonte donnée, à un produit entièrement satisfaisant.

Nous avons indiqué qu'on juge quelquefois utile de verser hors de la cornue la plus grande partie de la scorie phosphoreuse ; cet enlèvement est immédiatement suivi de l'addition recarburante qui, eu égard à la forte oxydation du fer, doit être considérable et représenter au moins 10 pour 100 du poids initial. Son importance varie du reste avec la qualité qu'on veut obtenir ; a-t-on en vue la production d'acières extra-doux, on réduit l'addition autant que possible, et on l'emploie aussi riche que possible en manganèse. Cherche-t-on au contraire le métal pour rails, on augmente le poids de l'addition, qui se rapproche alors, quant à la composition, du spiegeleisen ordinaire. L'emploi des alliages siliceux permet aussi d'introduire du silicium, dans le produit final si on le désire. La latitude que donne cette manière d'agir fait paraître singulière une opinion quelquefois exprimée d'après laquelle les rails provenant d'acier déphosphoré seraient, quoi qu'on fasse, d'un usage moins avantageux que les rails fabriqués par le procédé acide. Dès lors que deux aciers présentent la même composition chimique, fournissent aux essais mécaniques les plus variés des résultats identiques, vouloir leur attribuer des différences de qualité, c'est retomber dans des considérations que la science expérimentale condamne aujourd'hui. Il en serait autrement pour des êtres organisés ; mais malgré la théorie cellulaire des aciers qui n'a pas, en somme, d'autre but que d'expliquer d'une manière ingénieuse certains arrangements moléculaires, l'action vitale et ses conséquences mystérieuses n'ont rien à voir dans les études que nous faisons ici. Les rails déphosphorés ont peut-être été livrés à l'origine en métal trop doux. Qu'on durcisse ceux qui restent à faire par une addition appropriée, et leur qualité ne laissera absolument rien à désirer, aux yeux des ingénieurs qui tiennent à la dureté.

devons examiner maintenant quels changements la déphosphoration a introduits dans les dispositions générales des ateliers et dans la construction des appareils. La plus importante résulte de l'emploi si caractéristique de la chaux éteinte. Ces additions varient quant à leur poids et leur répartition, mais on en fait ordinairement une première accompagnant le chargement de la fonte et représentant environ 8 pour 100 de son poids ; les additions successives au cours du soufflage peuvent doubler ce chiffre : c'est donc, pour une charge de 10 tonnes, un poids total d'environ 1600 kilogrammes de chaux à introduire dans la cornue. Un atelier pour la cuisson de la chaux devient donc en pareil cas une véritable annexe de l'atelier Bessemer lui-même, et c'est là un fait dont il convient de tenir compte dans les installations nouvelles. Les anciens ateliers se sont accommodés comme ils ont pu aux exigences de cette nouvelle fabrication.

Quels que fussent les procédés et les matières employées pour le garnissage des cornues basiques, on pouvait craindre en commençant de les voir présenter une bien moindre résistance à l'action dissolvante du métal en ébullition que les garnissages en argile, dont les propriétés plastiques sont bien connues. En effet, la difficulté d'obtenir des matériaux résistants a été une des principales difficultés qu'a rencontrées le développement du nouveau procédé. Cette usure rapide, jointe aux additions calcaires, devait donner une quantité de scories bien plus considérable qu'autrefois ; aussi les cornues des anciens ateliers se sont-elles, pour la plupart, trouvées trop petites, et l'on a, dans les nouvelles installations spécialement faites en vue de la déphosphoration, disposé immédiatement trois convertisseurs de très grandes dimensions, de telle sorte que l'un d'eux pût être en réparation, les deux autres travaillant par paire et alternativement comme dans le procédé acide ordinaire. Hâtons-nous de dire que les inquiétudes conçues à l'origine n'ont pas été justifiées. En toutes choses les commencements sont particulièrement difficiles, mais aujourd'hui on fait sur les fouds en dolomie jusqu'à trente opérations, et les cornues peuvent en fournir plusieurs centaines sans que leur réfection complète soit reconnue nécessaire.

La déphosphoration n'a que peu modifié les autres appareils employés dans l'atelier. La machine soufflante devait naturellement rester absolument en dehors de ces modifications. Les poches de coulée doivent être assez grandes pour recueillir facilement le métal et la scorie qui flotte au-dessus. La portion de cette scorie qu'on enlève avant l'addition doit, autant que possible, être rapidement conduite hors de l'atelier, dont sinon elle élèverait inutilement la température. Une bonne disposition consiste à la recevoir dans des wagonnets en tôle arrivant dans la fosse de coulée par une voie souterraine spécialement destinée à leur circulation. Les appareils de manœuvre doivent être d'un maniement au moins aussi facile et aussi prompt que pour le procédé acide, car ce que nous avons dit de l'allure rapide de l'opération montre qu'on a plutôt affaire à un métal froid. Tout ce qui peut hâter la coulée assure donc une diminution du déchet résultant de la solidification trop hâtive du métal dans ses récipients provisoires. Cette coulée se fait du reste de la même manière dans les deux cas, et elle exige les mêmes soins.

Étude économique du procédé. — A part la complication résultant des additions calcaires, le prix de revient de l'opération basique n'est pas sensiblement plus élevé que celui de l'opération acide. Pour les aciers durs, l'addition recarburante

devant être plus forte que dans l'autre méthode, relève, dans une certaine mesure, le prix de revient de ces aciers; les matériaux réfractaires peuvent aussi, dans certains cas, devenir plus coûteux que les argiles mêmes les plus renommées. Comme nous le disions en commençant, ces quelques inconvénients sont largement compensés par le prix de revient des minerais devenus ainsi utilisables, et qui forment dans la Lorraine et dans le Luxembourg, pour ne parler que des régions qui nous concernent, un gisement justement réputé.

C'est donc le nord-est de la France qui est devenu le grand centre d'approvisionnement des aciers déphosphorés, comme il était déjà celui des fontes de moulage et de puddlage. Trois grandes aciéries, celle de *Jœuf*, appartenant à MM. de Wendel, celle de *Mont-Saint-Martin*, exploitée par la Société des aciéries de Longwy, celle de *Trith-Saint-Léger* près de Valenciennes, employant des fontes coulées dans le pays de Nancy, pratiquent avec succès le nouveau procédé qui, surtout pour la production des aciers doux aptes à remplacer les fers de qualité supérieure, est appelé à un grand avenir.

Si c'est en Angleterre que le procédé Thomas a pris pratiquement naissance, c'est l'Allemagne qui a contribué à sa propagation, et à cet égard les usines de *Hærde* occupent le premier rang. On lira avec intérêt les communications faites par M. Gauzier, en 1880, à notre Société des ingénieurs civils sur les importants travaux de M. Massenez, directeur de cet établissement. Depuis lors, un atelier de six cornues, des plus grandes dimensions, a été construit à *Peine*, en Hanovre. On y traite les fontes d'*Ilse*, dont notre dernier tableau donne l'analyse; un rapport récent fait à l'assemblée générale de la Société à laquelle ces établissements appartiennent indiquait comme prix de revient de leurs fontes Thomas le chiffre de 25 marks, soit environ 50 francs. Ceci explique la terrible concurrence que font aujourd'hui les produits métallurgiques allemands à ceux de tous les pays qui les entourent.

L'Autriche-Hongrie possédant en Bohême des dépôts considérables de minerais de fer phosphoreux, les ateliers Thomas et Gilchrist devaient nécessairement s'y développer. Les usines de *Witkowitz*, de *Kladno* et de *Teplitz*, qui, comme production, comptent parmi les plus importantes de toute la monarchie, marchent surtout aujourd'hui en métal déphosphoré. Les lingots d'acier extra-doux qu'elles produisent descendent vers le Sud et viennent faire concurrence jusqu'en Styrie et en Carinthie aux fers si justement réputés de ces contrées. Il y a là une situation analogue à celle qui se produit en France pour les usines du Nord par rapport à celles du Centre et du Midi. C'est ainsi qu'une découverte heureuse peut modifier profondément la situation économique de régions entières; certains intérêts en sont quelquefois atteints, mais le grand principe du travail moderne, abaissement du prix du produit avec diminution de la fatigue de l'ouvrier producteur, ne cesse pas d'y trouver son application.

Emploi des scories phosphoreuses. — Il nous reste, pour terminer ce qui concerne la déphosphoration, à faire mention d'une heureuse circonstance qui permet ici à l'industrie et à l'agriculture de se donner la main. Le phosphore contenu dans la fonte passant entièrement dans une scorie calcaire, l'idée devait naturellement se présenter d'utiliser la combinaison de ces deux éléments pour la fabrication des engrains artificiels, dont le phosphate de chaux est, comme on sait,

un des éléments les plus importants. Les scories du procédé Thomas contiennent ordinairement de 15 à 20 pour 100 d'acide phosphorique, et la chaux représente près de la moitié de la masse totale. Le fer s'y rencontre aussi malheureusement en quantité assez notable, et sa présence a pendant quelque temps entravé l'utilisation du nouveau produit. Ces difficultés ont disparu aujourd'hui; on possède des méthodes permettant d'éliminer le fer et les autres corps qui l'accompagnent pour arriver à un phosphate de chaux pur susceptible d'être transformé en superphosphate. Bien plus, des expériences récentes montrent que la scorie à l'état naturel peut rendre également de grands services sur les terrains où elle est répandue. Ces résidus, loin d'encombrer les cours des usines, tendent donc à devenir ainsi un produit marchand d'un prix qui ne saurait jamais être bien élevé, mais qui rendra à notre sol un des principaux éléments de sa fertilité, en permettant de recourir dans une moindre mesure à des produits de qualité souvent douteuse et de provenance étrangère.

CHAPITRE XIII

FABRICATION DE L'ACIER MARTIN

Principe du procédé. — Construction des fours et des gazogènes. — Matériaux réfractaires.
Étude des résultats économiques.

Le procédé qui porte aujourd'hui le nom de procédé Martin consiste, comme nous l'avons dit dans le premier chapitre de la seconde partie, à produire l'acier fondu au réverbère par la réaction du fer doux sur la fonte avec ou sans addition de minéraux de fer riches. L'appareil employé est un réverbère muni de régénérateurs Siemens, qui seuls permettent d'atteindre une température assez élevée pour opérer la fusion sur sole en grande masse. Ce n'est donc pas sans raison que quelques ingénieurs joignent, dans la dénomination du procédé, au nom de Martin celui de Siemens, qui a été pour M. Martin un précieux collaborateur.

La théorie du procédé Martin est bien plus simple que celle du procédé Bessemer. On conçoit qu'en amenant à l'état liquide une fonte plus carburée que l'acier qu'on veut obtenir et en dissolvant dans cette fonte un fer qui l'est moins que ce même acier, on arrive par des mélanges convenables à une qualité entièrement satisfaisante. La difficulté était ici : 1^o d'obtenir une température suffisamment élevée pour permettre cette réaction de la fonte en fusion sur le fer solide ; 2^o d'arriver à une construction de four et à une qualité de produits réfractaires qui résistent à cette température élevée, au moins pendant un nombre de charges suffisant pour assurer un prix de revient acceptable. Ces deux questions sont aujourd'hui entièrement résolues.

Nous n'aurons pas non plus ici à procéder à un examen analytique des matières premières à employer comme nous l'avons fait dans l'étude du procédé Bessemer. La fonte dont on fait usage est ordinairement grise, et la qualité bonne pour la cornue Bessemer, est aussi convenable pour le four. Si l'on dispose de quantités considérables de fers et de riblons et qu'on veuille économiser l'emploi de la fonte, on devra prendre cette dernière aussi chargée que possible en silicium et en carbone ; si au contraire les riblons manquent, le bain initial devra se composer de fontes gris clair passant même au blanc et dont on prendra alors une plus forte proportion. Nous le répétons, la pratique seule indique dans quelle proportion le mélange doit être fait, et l'opération étant beaucoup plus longue que dans le procédé Bessemer, il est toujours facile de rectifier pendant sa marche le mélange qu'on s'était d'abord proposé d'employer.

Construction des fours et des gazogènes. — La description de l'invention de Siemens proprement dite ne saurait trouver place ici. Cette idée, si savamment ingénieuse, qui consiste à utiliser la chaleur spécifique des produits de la combustion pour chauffer l'air destiné à la combustion suivante, l'application pratique de l'idée, réalisée par le passage alternatif des gaz brûlés et de l'air à travers des chambres en briques successivement chauffées et refroidies, sont connues de tous les ingénieurs. Les figures 24, 25 et 26, qui reproduisent les diverses coupes d'un four dont la bonne marche a été constatée, rappelleront les dispositions principales de l'appareil à ceux qui les auraient perdues de vue. Les traités de métallurgie et les nombreuses brochures publiées par M. Martin lui-même fournissent d'ailleurs à cet égard toutes les indications nécessaires.

Le four Martin a pour complément indispensable un gazogène. Il se présente le plus souvent sous forme d'une simple cuve à grille plate pour certains combustibles et à grille inclinée pour ceux qu'on emploie le plus généralement aujourd'hui. Les gazogènes peuvent être à deux et même à quatre compartiments juxtaposés, et, dans ce cas, les produits de la distillation se réunissent dans une cheminée centrale en tôle. Pour un four produisant 15 tonnes d'acier par jour, quatre gazogènes avec grille de 1^m,75 de largeur sur 0^m,50 de profondeur et inclinée à 60° suffisent si l'on emploie un charbon tout-venant de bonne qualité.

Quelle que soit la forme adoptée, ce qu'on doit chercher avant tout, c'est de réaliser la distillation théorique en vase clos, c'est-à-dire d'avoir le moins d'entrée d'air possible par les grilles, et d'obtenir un gaz franchement réducteur. L'oxydation ne devrait être recherchée que dans le cas où la fonte prédominerait beaucoup par rapport aux additions ferreuses ; mais ce n'est là qu'un cas exceptionnel et qui doit être évité dans la pratique. On doit éviter également, avec le plus grand soin, de faire usage de combustibles humides, qui, par le dégagement de la vapeur d'eau, apportent le plus grand trouble dans la marche du procédé.

L'emplacement du gazogène par rapport au four a donné lieu, dans les premiers temps de la fabrication de l'acier sur sole, à de nombreuses discussions. On croyait d'abord trouver avantage à éloigner le gazogène et à amener les gaz combustibles froids et dépouillés des goudrons provenant de la distillation, qui pouvaient alors se condenser sur le long parcours que ces gaz avaient à faire. L'usine de Terre-Noire, qui, si elle n'a pas été la première à employer les fours Martin, a beaucoup contribué à leur étude, a promptement rejeté cette manière de faire, et construit le gazogène dans le voisinage immédiat du four. Les goudrons, qui pouvaient être un embarras dans des conduites de gaz de trop faible section et avec des boîtes de distribution de dimensions trop exigües, deviennent ainsi négligeables et augmentent le pouvoir calorifique du combustible employé ; la question se trouve donc tranchée d'une manière définitive.

La construction du four lui-même donne également lieu à quelques observations. Les quatre chambres destinées à la régénération de la chaleur sont remplies de briques en chicane dont la figure 27 montre à une plus grande échelle la disposition. Les deux chambres extrêmes servent ordinairement à l'admission du gaz et les deux chambres du milieu à celle de l'air. Dans les premières constructions on donnait aux chambres à air des dimensions un peu supérieures à celle des chambres à gaz. C'est ainsi que dans le four dont la figure est reproduite, la

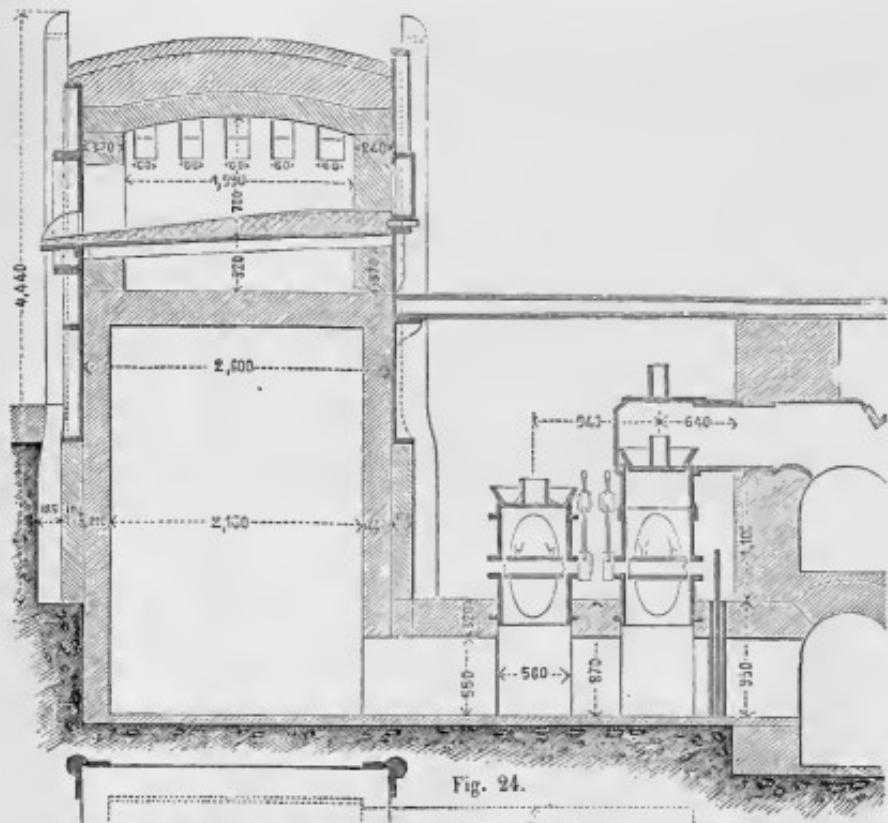


Fig. 24.

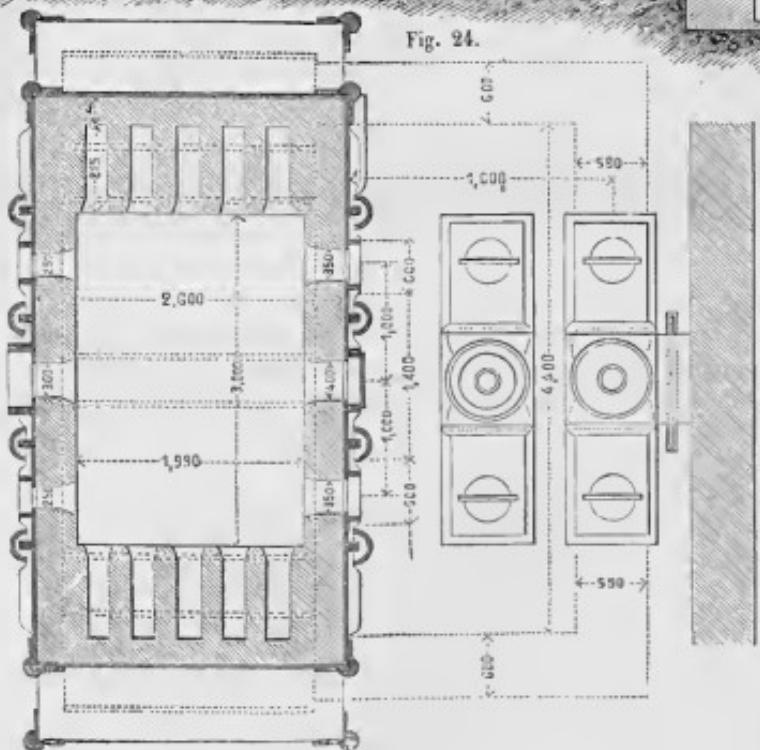


Fig. 25.

largeur des premières était de 1^m,48 et celle des secondes de 1 mètre seulement, la longueur étant de 2^m,16 et la hauteur commune, depuis le radier jusqu'à la clef de voûte, de 2^m,50. Depuis, on a, comme toujours, augmenté les di-

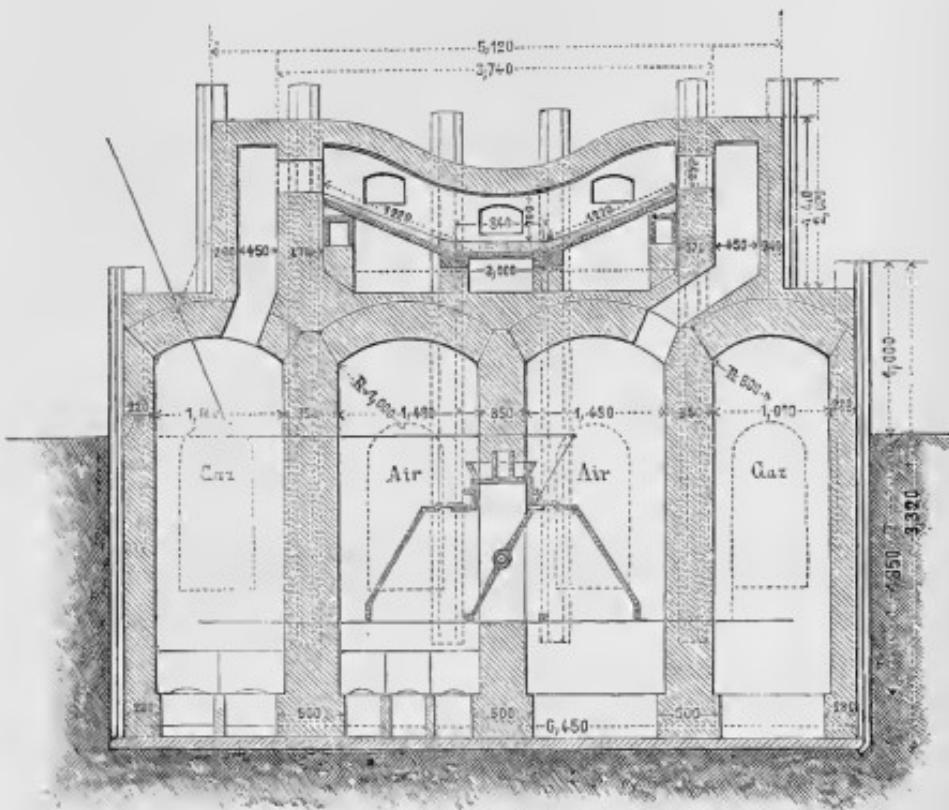


Fig. 26.

mensions pour arriver à une production plus forte. On peut indiquer, comme convenant pour une production de 8 tonnes, des dimensions égales pour les quatre chambres de 1^m,50 de large, 2^m,60 de long et 5^m,50 de hauteur. Ces dimensions



Fig. 27.

correspondent à celles du gazogène à quatre compartiments que nous avons décrit plus haut.

Diverses combinaisons ont été adoptées pour l'introduction de l'air et du gaz dans le laboratoire du four. Les carneaux d'admission sont au nombre de deux seule-

ment lorsqu'ils sont transversaux au grand axe du four; il y en a trois, cinq et même sept lorsqu'ils ont leur plus grande longueur parallèle au grand axe du four lui-même; dans ce cas ils sont alternés comme l'indique la figure 26. L'emploi des carneaux multiples introduit naturellement une certaine complication dans la construction de l'appareil, mais les gaz sont mieux distribués, la combustion est plus régulière et l'usure des briques moins considérable que dans l'autre cas. Quoi qu'il en soit, on doit toujours chercher à faire plonger vers le bain métallique les gaz entrant dans le laboratoire. Nous aurons à examiner plus loin une modification du four Martin qui réalise au plus haut point cette disposition.

Le laboratoire du four présente la disposition commune à tous les fours à réverbère. Il se compose essentiellement de plaques de sole en fonte sur lesquelles on dame une couche de 20 à 50 centimètres de sable siliceux. Comme l'indique la figure, la sole est ordinairement divisée en trois parties soutenues par quatre piliers, disposés de telle sorte que l'air puisse circuler librement au-dessous et combattre l'échauffement intense qu'elle doit supporter.

Les dimensions de la sole varient entre des limites assez larges. Celle de notre dessin a 5 mètres de long sur 2^m,60 de large; nous avons vu des fours produisant environ 8 tonnes et dont la longueur de sole était de 4^m,10 avec une largeur de 2^m,30. Aujourd'hui qu'on construit des fours faisant des charges de 12 et même 15 tonnes, ces dimensions sont notablement dépassées.

Le chargement du four se fait ordinairement par trois portes dont les dimensions varient avec celles du four lui-même. Du côté opposé se trouve placé le trou de coulée, au point le plus bas de la sole. De chaque côté sont ménagées des portes plus petites que celles servant au chargement, et au moyen desquelles on fait à la sole et aux pieds-droits de la voûte les réparations qui peuvent être tentées sans un arrêt complet du four.

La voûte du four est, comme on le voit, parallèle à la sole. Certains constructeurs lui donnent au contraire une forme concave qui concentre bien moins la chaleur, mais est plus favorable à sa conservation. La forme dépend en somme du traitement qu'on se propose d'employer, de la nature des matériaux utilisés et des produits qu'on veut obtenir. Chaque ingénieur reconnaîtra bien vite la forme la plus avantageuse dans des conditions données.

Matériaux réfractaires. — La qualité des produits réfractaires présente pour la bonne marche d'un four Martin une importance considérable. Les briques argileuses les plus réfractaires ne possèdent pas, par suite de leur composition polybasique, une résistance suffisante, l'idée est venue d'employer le quartz en l'agglomérant avec une proportion de chaux assez faible pour ne point donner naissance à un silicate fusible. Des essais faits pour la première fois à Dinas, en Angleterre, ont montré qu'un mélange de 98 pour 100 de quartz et de 2 pour 100 de chaux donnait le maximum d'insolubilité, tout en présentant encore une résistance mécanique assez grande pour permettre la cuisson des briques et leur mise en place. Le quartz employé doit en outre être choisi avec le plus grand soin, exempt d'oxydes ferrugineux et d'alcalis, et broyé de telle sorte qu'il forme un mélange de poudre fine et de fragments présentant l'aspect de grêlons. Les briques façonnées en mouillant la matière aussi peu que possible gagnent à être comprimées sous une presse

hydraulique, et à être cuites énergiquement. Elles peuvent, dans ces conditions, résister à plusieurs centaines d'opérations.

Comme on le fait pour tous les fours à réverbère, les fours employés pour la fusion de l'acier sur sole sont entourés d'une armature composée de fortes plaques en fonte reliées par des tirants en fer. Cette précaution est d'autant plus nécessaire que l'énorme différence de température entre le four froid et le four en pleine marche amène des dilatations qui auraient pour conséquence une détérioration rapide si l'on n'y mettait ainsi obstacle.

Les matières chargées dans le four Martin sont le plus souvent chauffées au rouge avant leur introduction sur la sole. Cela n'est point absolument nécessaire, mais ce chauffage préalable rend l'opération plus rapide, ce qui compense amplement la dépense résultant de l'entretien et de la marche d'un second four; celui-ci, du reste, peut être construit comme un réverbère ordinaire et utiliser un combustible de moindre qualité. Le four de réchauffage est placé sur la même plate-forme que le four de fusion et généralement à angle droit par rapport à lui, de manière que le fondeur puisse, avec le moins de travail possible, transporter les gueusets et les riblons de l'un dans l'autre.

Les dispositions à prendre pour la coulée sont les mêmes pour l'acier Martin que pour l'acier Bessemer. On peut placer les fours autour d'une fosse circulaire comme le sont les cornues Bessemer, et alors les dispositions de la grue centrale et de la poche sont exactement les mêmes dans les deux cas. Souvent aussi, on préfère éviter l'intermédiaire de la poche et on coule directement du four dans les lingotières qui sont placées soit sur de petits wagonnets circulant sur un chemin de fer dont l'axe est parallèle au grand axe du four, soit sur une petite plaque tournante qui permet à chaque lingotière de venir se placer sous la coulée. Nous préférons, pour notre part, l'emploi de la poche comme garantie d'une plus grande homogénéité.

Étude des résultats économiques. — L'appareil étant décrit, nous passons maintenant, comme nous l'avons fait pour le Bessemer, au roulement de l'atelier. Lorsque cet atelier comprend un grand nombre de fours (plusieurs usines en comptent jusqu'à douze dans une même halle), un chef d'atelier est nécessaire; si, au contraire, l'installation ne comporte qu'un ou deux fours, un chef fondeur suffit; il est assisté de deux aides par four, et d'un certain nombre de démoliteurs et de manœuvres. L'opération est ici plus facile qu'au Bessemer; elle exige un bien moindre déploiement de moyens mécaniques et rentre plus dans la pratique métallurgique ordinaire. Faire durer le four le plus longtemps possible sans sacrifier, bien entendu, la qualité du produit, tel est le principal souci du chef et de ses auxiliaires.

Comme la cornue Bessemer, le four doit, avant la première charge, être porté à une haute température. On l'obtient en faisant sur la sole un feu de bois qu'on entretient avec soin jusqu'au moment où l'air et le gaz sont introduits dans le laboratoire. Ce premier allumage du combustible gazeux est quelquefois accompagné d'explosions lorsque le mélange d'air et de gaz ne se produit pas dans les proportions convenables. Ces petites difficultés sont aussi promptement surmontées par la pratique de l'appareil.

Nous supposons, pour pouvoir entrer dans quelques détails, une opération devant donner 8 tonnes d'acier et pour laquelle on emploie 25 pour 100 de fonte et 75 pour 100 de riblons et de déchets de fer et d'acier. Les 2000 kilogrammes de fonte qui en résultent sont ordinairement chargés en une seule fois, et leur fusion complète se trouve achevée au bout de trois quarts d'heure environ. On commence alors le chargement des riblons par additions de 200 à 500 kilogrammes, en ne laissant entre deux chargements consécutifs que le temps nécessaire à la fusion complète de l'addition précédente. Pour la faciliter, le bain métallique est soumis fréquemment à des brassages qui se font encore aujourd'hui à la main, bien que la chaleur intense qui se dégage du four rende ce travail particulièrement pénible pour l'ouvrier qui doit l'accomplir.

Au fur et à mesure que les additions ferreuses ou aciéreuses s'accumulent, la teneur en carbone du bain diminue. La connaissance des matières employées et l'aspect de la scorie qui surnage, permettent de se rendre compte de l'état d'avancement de l'affinage; on a coutume pourtant de prendre vers la fin de l'opération un certain nombre d'éprouvettes, ce qui est beaucoup plus facile qu'au Bessemer, et de les aplatis en une petite galette dont l'examen donne de très exactes indications qu'on utilise pour déterminer la quantité de spiegel ou de ferro-manganèse à ajouter pourachever l'opération.

On peut être surpris d'entendre parler ici d'une recarburation alors que l'opération Martin se fait, comme on l'a vu, dans une atmosphère réductrice; il serait facile assurément d'arrêter l'affinage au moment voulu. L'addition de spiegel est néanmoins d'un usage général; elle a surtout en vue la réincorporation d'une certaine proportion de manganèse, car les faibles quantités que les riblons ou déchets ajoutés pouvaient en contenir ont en grande partie disparu pendant ce long séjour au contact d'une scorie siliceuse. Lorsqu'on veut, tout en assurant la présence du manganèse, obtenir un métal extra-doux, le spiegel est naturellement remplacé par le ferro-manganèse à haute teneur.

L'opération se termine ici par le débouchage du four, qui présente quelquefois des difficultés analogues à celles qu'on rencontre lors de la coulée des hauts fourneaux. Si au contraire le bouchon n'a pas été fait d'une manière suffisamment hermétique, on est exposé à voir pendant l'opération le métal fondu suinter au travers ou même le repousser violemment, ce qui peut donner lieu à de graves accidents.

La durée totale d'une fusion varie avec le poids des matières fondues et leur composition. On compte ordinairement 2 charges 1/2 à 3 charges par 24 heures, cu égard au temps nécessaire après chaque coulée pour la réparation de la sole et des parties qui l'avoisinent. Un four Martin, quelles que soient ses dimensions, est donc toujours un appareil bien moins productif qu'une cornue Bessemer. Son installation est, il est vrai, beaucoup moins coûteuse; c'est l'auxiliaire utile des petites aciéries, et il a en outre l'avantage de permettre l'emploi des vieilles matières et des déchets que les cornues Bessemer peuvent employer en partie, mais en s'écartant de leur destination.

Les conditions économiques de la marche des fours Martin varient nécessairement dans d'assez larges limites, suivant la nature des matières premières et du combustible employé. Les riblons et autres déchets de fer et d'acier ont, il faut bien le

remarquer, une valeur très variable; d'autre part, le combustible peut être soit du charbon d'excellente qualité, soit du lignite ayant un pouvoir calorifique beaucoup moins élevé, mais généralement d'un prix bien inférieur. On peut admettre que la consommation de combustible dans les conditions ordinaires est, pour le four Siemens et le petit réchauffeur qui lui est annexé, de 500 à 600 kilogrammes; le déchet qui accompagne nécessairement l'opération est d'environ 5 pour 100. Il augmente lorsque la proportion de fonte augmente, puisque celle-ci contient un plus grand nombre d'éléments à enlever par la scorie.

Comme pour le procédé Bessemer, nous établissons ci-dessous, pour le procédé Martin, un prix de revient moyen composé à l'aide de données empruntées à un grand nombre d'établissements, et en supposant les mêmes prix de matières que ceux appliqués dans l'étude du procédé Bessemer. On arrive dans ces conditions aux résultats suivants :

	francs.
Salaires	6 00
Combustible	6 50
Matériaux refractaires.	8 75
Entretien et réparation de l'atelier.	1 75
Marchandises de magasin	1 50
Force motrice.	0 40
Frais généraux de l'atelier.	2 00
	<hr/>
	26 90
5 pour 100 de déchet d'un mélange de fonte et de riblons évalués à 80 francs la tonne	4 00
	<hr/>
TOTAL	50 90

Si l'on se reporte au prix de revient établi pour l'acier Bessemer, on constate une différence d'environ 6 francs par tonne en faveur du premier. Aussi réservait-on jusqu'à présent l'acier Martin pour les produits de qualité, tels que les tôles, les esieux, pour lesquels une grande douceur, conséquence d'une grande pureté, justifiait une majoration de prix. On arrivait en effet difficilement par la méthode Bessemer acide à produire les qualités extra-douces que le procédé Thomas Gilchrist permet aujourd'hui de réaliser couramment.

Nous voudrions, comme nous l'avons fait pour le Bessemer, présenter dans un tableau rapide l'histoire des origines et du développement de la fabrication de l'acier sur sole; mais la tâche est encore plus difficile, et nous commettrons nécessairement bien des omissions. C'est vers 1866 que M. Martin, inspiré par les essais de M. Sudre aux forges de Montataire, et du colonel Alexandre à la fonderie impériale de Villeneuve, réussit à rendre le procédé pratique dans son usine de *Sireuil*. Son exemple fut promptement suivi par M. Verdié à *Firminy*. En 1869, les usines de *Saint-Jacques* à Montluçon et celles appartenant, dans la même ville, à la Société de *Commentry-Fourchambault*, possédaient des fours Martin, et, sans avoir encore surmonté toutes les difficultés du procédé, arrivaient déjà à une fabrication régulière. Des installations conçues sur une vaste échelle furent bientôt entreprises par la Compagnie de *Terre-Noire* et par le *Creusot*. L'adhésion de ces deux

grands établissements devait donner à l'emploi du nouveau procédé sa dernière sanction, et lui assurer en France la confiance dont il a toujours joui depuis lors.

En Autriche-Hongrie, les premières expériences furent entreprises avec le concours de M. Verdié aux aciéries de *Gratz*, appartenant à la Société des chemins de fer du sud de l'Autriche. Le procédé s'y développa lorsqu'on reconnut que la production des gaz nécessaires à la marche du four pouvait être réalisée non seulement avec les houilles de formation ancienne, peu abondantes dans la monarchie austro-hongroise, mais aussi au moyen de lignites de qualité convenable dont il existe en Styrie et en Carinthie de riches gisements. Les usines de *Neuberg* et de *Donawitz*, dans la première de ces deux contrées, celles de *Reschitza* et de *Diosgyör*, en Hongrie, emploient avec succès le four Martin pour la production de toutes les variétés d'acier. L'usine de *Gratz* s'est signalée de bonne heure par la construction des fours de grandes dimensions dont la production, en 1878, était déjà de 12 tonnes par opération.

L'Allemagne fait largement usage de fours Martin, mais les résultats de la fabrication en sont moins connus. Une publication périodique, émanant de la Société des maîtres de forges de Dusseldorf et portant le titre de *Eisen und Stahl*, a néanmoins publié, en 1883, sur cette matière, des renseignements intéressants. Les importantes aciéries du bassin de la Ruhir, comme Krupp à *Essen*, la Société de *Bochum*, etc., font certainement un large usage des aciers Martin ; mais ces grands fabricants ont depuis longtemps coutume de s'entourer d'un mystère qui empêche de fournir à leur égard des renseignements précis. En Belgique, l'usine de *Seraing* possède depuis quelques années des fours Martin construits d'après les mêmes principes que ceux de *Gratz* et dont la marche est entièrement satisfaisante.

Procédé Martin basique. — Le succès de la déphosphoration dépendant principalement, comme on l'a vu, de la basicité des matières réfractaires en contact avec le bain métallique, l'idée du four Martin basique devait naturellement se présenter à l'esprit. La question était d'autant plus digne d'intérêt que la plupart des rails en fer actuellement dans les voies de chemin de fer, présentent des teneurs en phosphore qui les rendent impropre à la refonte par le procédé acide. La possibilité d'obtenir une scorie Martin, entraînant avec elle le phosphore, se présentait donc comme un problème industriel d'une utilité pratique incontestable. On a pu facilement arriver à une sole durable en faisant usage d'un pisé dolomitique fortement comprimé. La construction de la voûte, qui n'est pas en contact direct avec le métal, ne pouvait présenter de difficultés. Le point délicat est l'établissement des pieds-droits, qui ont toujours été la partie faible du four, et qui, ayant à relier deux maçonneries de composition chimique très différente, doivent être l'objet d'une étude toute spéciale. L'usine de *Gratz*, déjà plusieurs fois mentionnée, celle de Saint-Jacques à Montluçon, ont réalisé de grands progrès dans ce sens, et ce sont moins des difficultés techniques que des considérations économiques qui s'opposent actuellement au développement rapide de la déphosphoration sur sole.

Modifications du four Martin. — Systèmes Ponsard, Pernot, et autres. — Après nous être occupé du four Martin primitif, nous devons faire connaître ici quel-

ques modifications de détail reposant sur des conceptions ingénieuses, mais que des difficultés pratiques ont empêchées de se propager.

Dans le four *Ponsard* le gaz entre directement dans le laboratoire en venant du gazogène, tandis que l'air nécessaire à la combustion est chauffé avant son entrée dans le four dans un récupérateur de forme spéciale, composé de briques creuses chauffées également par les produits de la combustion. L'appareil de régénération de la chaleur présente ainsi de moindres dimensions que les quatre chambres du four Siemens primitif; on supprime en outre les manœuvres de clapets dont le fonctionnement laisse souvent à désirer. Ces avantages sont malheureusement compensés par les difficultés de fabrication des briques creuses spéciales, et par l'insuffisance de chaleur nécessaire pour arriver à la fusion complète des aciers doux. Le four Ponsard n'est donc employé que dans un petit nombre d'usines pour la refonte des spiegels ou ferro-manganèse servant d'addition dans les opérations Bessemer.

M. Pernot, ingénieur aux usines de Saint-Chamond, voulant accélérer et faciliter le brassage de l'acier en fusion, a eu l'idée de substituer à la sole fixe une sole formée d'une cuve circulaire et mobile pouvant être enlevée de dessous la voûte et réparée facilement, et d'animer cette cuve d'un mouvement de rotation autour d'un axe légèrement incliné sur la verticale. C'est une disposition qui, avec le mouvement rotatoire en plus, rappelle celle des fours de coupellation pour argent. Nous avons eu l'occasion d'installer, dès 1876, à l'usine d'Anina, en Hongrie, un four (Pernot), construit exactement d'après les douanées de l'inventeur; le rendement était certainement supérieur à celui d'un four Martin dont la dépense d'installation aurait été la même; la possibilité de remplacer entièrement la sole sans démolir la voûte, la diminution de fatigue des fondeurs qui n'avaient plus à brasser le bain, étaient certes des avantages appréciables. Là aussi ils étaient malicieusement compensés par quelques inconvénients inherents au système, parmi lesquels l'usure rapide des parois de la cuve et du cordon qui se trouvait placé au-dessus d'elle en surplomb, doit être citée en première ligne. Le four Pernot s'est donc peu répandu hors de l'enceinte de l'usine où son inventeur a su, par des soins constants, en faire un appareil susceptible de lutter avec avantage contre le four à sole fixe.

Le tome second du *Traité de métallurgie*, de Gruner donne une description détaillée des fours mentionnés ci-dessus, et le dessin en est fourni dans les planches jointes au volume. Nous n'insisterons pas davantage sur leur fonctionnement, puisqu'ils n'occupent qu'une place restreinte dans le grand outillage métallurgique actuel.

Il nous reste, en terminant, à mentionner ici deux appareils également destinés à la fabrication de l'acier fondu: l'un étudié par MM. Klapp et Griffith, et l'autre par M. Walrand, connu déjà par divers travaux sur la déphosphoration. La mise en marche de ces nouveaux fours est de date encore trop récente pour que nous puissions nous prononcer sur eux dans une publication qui s'est imposé pour règle de n'enregistrer que des faits acquis. Les ingénieurs qui écriront après nous sur cette matière auront l'occasion de faire connaître les résultats obtenus, et nous ne pouvons, pour le moment, que citer les noms de ces nouveaux inventeurs en souhaitant le succès de leurs travaux s'ils doivent réaliser un nouveau progrès industriel.

CHAPITRE XIV

FABRICATION DE L'ACIER AU CREUSET

Résumé historique. — Creusets. — Fours de fusion. — Marche des ateliers.

Après avoir étudié, avec les procédés Bessemer, Martin et leurs quelques modifications, des opérations métallurgiques d'origine relativement récente, il nous faut, avec la fabrication de l'acier au creuset, remonter loin dans le passé pour en trouver les premières traces. C'est en 1740 que Benjamin Hunstman établit à Handsworth, près de Sheffield, le premier atelier où l'acier fondu au creuset ait été produit d'une manière régulière. Faute de débouchés, la nouvelle industrie ne se développa que lentement, et ce fut seulement à la fin du siècle dernier qu'à Liège d'une part, dans la Loire de l'autre, les premières fusions purent être opérées sur le continent d'une manière à peu près satisfaisante ; elles se faisaient alors uniquement au moyen de l'acier cémenté.

L'idée d'obtenir l'acier au creuset par un mélange de fonte et de fer malléable, mise en avant par Réaumur, ne fut appliquée pratiquement que vers 1820 à la suite des travaux de Faraday et de Stodart, dont nous avons parlé dans notre premier chapitre. Cette manière de faire est aujourd'hui presque exclusivement employée.

La fusion de l'acier au creuset rentre d'une manière générale dans la méthode dite de fusion en *vase clos*. Elle s'emploie surtout aujourd'hui pour le cuivre et ses alliages, l'antimoine et les métaux précieux ; on peut se demander si, eu égard à la baisse constante du prix des produits en acier, ce procédé coûteux pourra être longtemps maintenu pour leur fabrication. Il l'est encore aujourd'hui, mais seulement pour les articles de qualité supérieure, et son étude doit trouver place ici. Elle se décompose nécessairement en deux parties : celle du creuset dans lequel le mélange à fondre se trouve placé, et celle du four où ce creusct est placé à son tour afin d'être porté à la température nécessaire pour la liquéfaction de son contenu.

Creusets. — Les dimensions des creusets employés pour la fusion de l'acier sont comprises entre des limites assez larges. Leur hauteur peut varier de 0^m,25 à 0^m,80, et, dans ces conditions, ils peuvent contenir de 10 kilogrammes à 60 kilogrammes de métal ; on se tient généralement dans la moyenne entre ces limites extrêmes, et nous avons vu employer fréquemment, dans les grandes usines de Westphalie, des creusets de 0^m,45 de hauteur avec une largeur maxima de 0^m,20. Cette plus

grande largeur se trouve, soit à la partie supérieure de telle sorte que les parois présentent une inclinaison faible mais régulière, soit au premier quart en partant de la partie supérieure, de manière à former une sorte de ventre coïncidant avec le haut du chargement. Avec ces dimensions, le poids du creuset est d'environ 12 kilogrammes et celui du contenu peut varier de 55 à 40 kilogrammes.

La pâte dont les creusets sont formés peut aussi être de composition variée. On emploie le plus souvent l'argile réfractaire de la meilleure qualité, mélangée avec une certaine proportion de graphite ; on a quelquefois substitué à ce dernier corps de la poussière de coke. On a aussi essayé le graphite pur, mais sans obtenir de résultats sensiblement supérieurs à ceux fournis par les mélanges argileux qui sont moins coûteux. Les fabricants d'acier ont d'ailleurs rarement à s'occuper de la préparation des creusets, pour la fabrication desquels de nombreuses maisons se sont spécialement outillées.

Pour que les creusets soient exposés au maximum de chaleur, il faut les placer, lorsqu'on fait usage de fours à vent, dans la zone de combustion où se produit l'acide carbonique, c'est-à-dire à une faible hauteur au-dessus des barreaux qui supportent le combustible. On se sert pour cela de disques en argile réfractaire, dits *fromages*, de 0^m,05 à 0^m,08 de hauteur. Enfin le creuset est muni d'un couvercle plat, percé d'un trou destiné à permettre le passage d'une baguette à l'aide de laquelle on fait une prise d'essai avant la fin de la fusion.

Fours de fusion. — Le four le plus usité encore aujourd'hui pour le chauffage des creusets est le four à vent. Il convient surtout aux faibles masses et se recommande par sa simplicité. On peut y placer un creuset unique, ou bien, lorsqu'on veut mieux utiliser la chaleur ou opérer sur de plus grandes masses, on en installe côté à côté deux, quatre, huit, ou même un plus grand nombre. Toutefois, pour que les fragments de coke puissent facilement envelopper les creusets de toute part, il faut que la distance entre deux creusets voisins, ainsi que celle qui sépare les creusets des parois du four, soit au minimum de 0^m,05 à 0^m,06. D'autre part, si ces chiffres sont dépassés, la dépense de combustible augmente inutilement. La limite à observer dépend elle-même de la qualité de ce combustible, de la dimension des creusets, enfin de circonstances qui varient d'une usine à une autre, mais que la pratique ne tarde pas à enseigner.

Ayant eu l'occasion de visiter à deux reprises les grandes fonderies d'acier au creuset de Krupp, à Essen, nous décrirons avec quelques détails la série des opérations qui y étaient alors pratiquées en faisant usage de fours à vent d'une construction analogue à celle que nous venons de décrire, et dont les figures 28 et 29 montrent la disposition.

Les fours étaient établis dans une grande halle rectangulaire (fig. 30). Sur les longs côtés étaient établis des fours spécialement destinés au chauffage du coke et des creusets avant leur introduction dans le four à vent, et consistant en une sorte de voûte de 4 à 5 mètres d'ouverture adossée au mur de la halle, libre sur le devant, et sur les pieds-droits de laquelle était posée une grille horizontale sur laquelle le coke et les creusets étaient alternativement placés. La figure montre en A l'emplacement de ces fours.

Les fours à vent étaient également disposés sur deux rangées parallèles et se

trouvaient entièrement au-dessous du sol de l'usine. Comme le montre la figure 29,

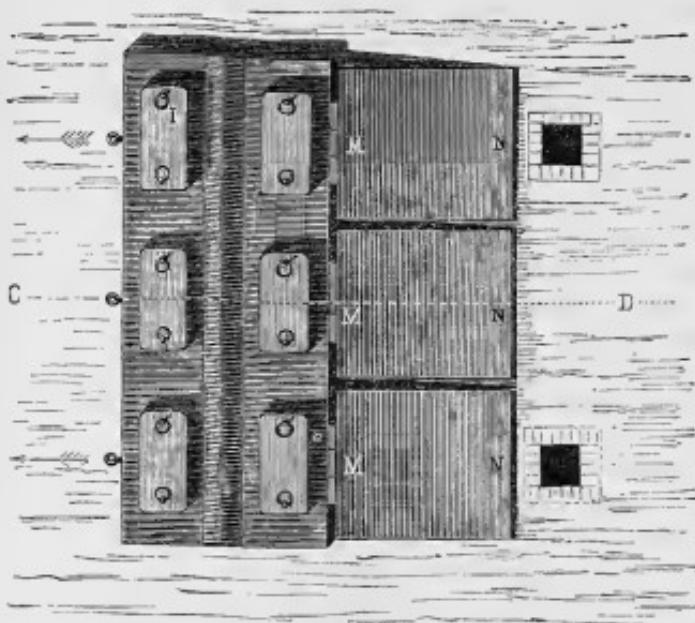


Fig. 28.

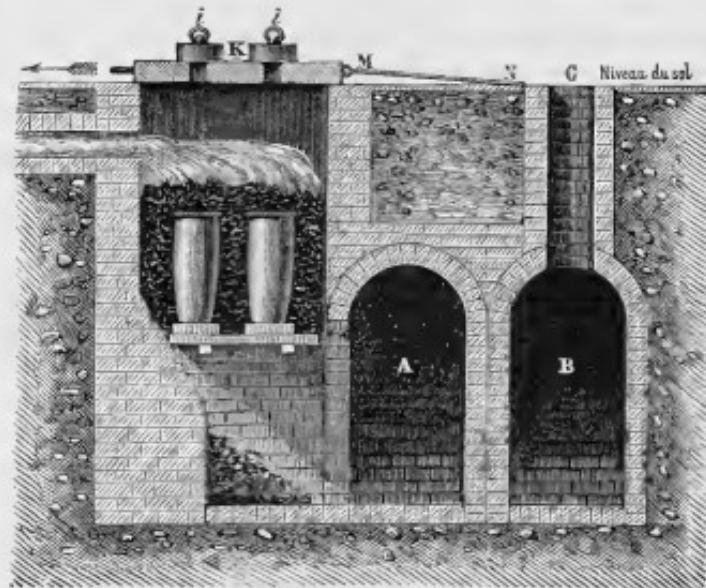


Fig. 29.

ils consistent essentiellement en une fosse à section rectangulaire de 1^m,80 de

long sur 0^m,60 de large et profonde jusqu'à la grille de 1^m,50 environ. Les flammes sortent par deux carneaux rectangulaires placés à 0^m,40 au-dessous du sol pour aller rejoindre une galerie parallèle à la rangée des fours et distante de leur axe de 3 mètres environ. Enfin l'installation du four est complétée par un couvercle en fonte K percé de deux ouvertures fermées par des bouchons I d'un enlèvement facile, et destinées à permettre de suivre la marche de la fusion sans enlever complètement le couvercle; ce dernier est muni de trois volets en tôle M N dont l'usage sera indiqué plus loin.

La grande halle de coulée de l'usine Krupp comptait, au moment où nous l'avons visitée, deux rangées de 24 fours contenant chacun 12 creusets. On pouvait donc faire concourir à la coulée d'un lingot 576 creusets qui, contenant en moyenne 35 kilogrammes de métal, permettaient d'arriver à un lingot de 20 tonnes provenant d'une seule fusion.

On comprend qu'une semblable opération n'est possible que si l'ordre le plus parfait règne dans toute la série des manutentions. Voici comment elles sont réglées en pareil cas.

Comme l'indique la figure 50, le point vers lequel converge tout le travail de l'atelier est la grosse lingotière cylindrique L placée au centre. Deux chenaux C, d'une grande longueur et supportés par des trépieds, y aboutissent, et on a soin de les établir de chaque côté sur une sorte de talus, de telle sorte que l'inclinaison naturelle du sol facilite l'écoulement du métal fondu vers son récipient. Au-dessus de chaque chenal sont placés quatre entonnoirs dans lesquels les ouvriers viennent verser le contenu de leurs creusets de manière à former un courant continu se dirigeant vers la lingotière. Dès que les creusets sont vidés, ils sont jetés par les petits puits R dans la galerie souterraine B, d'où on les retire dès qu'ils sont refroidis. Cette disposition a pour but de diminuer la chaleur qui se produirait dans la halle par l'amoncellement de ces matières surchauffées, et qui, malgré toutes les précautions prises, devient presque insupportable à la fin de la fusion.

Le défournement s'opère de la manière suivante :

Tous les ouvriers destinés à la manœuvre des creusets étant placés sur deux files de chaque côté de la rangée de fours, le chef d'atelier donne un premier signal pour faire enlever quelques barreaux de la grille, de manière à permettre à une partie du coke de s'écouler en dégageant le creuset. Ce travail est fait par des hommes qui se tiennent dans la galerie souterraine A, mais pour la moitié des fours seulement, car tout le travail est divisé en deux séries, et les fours rangés dans la seconde n'entrent en action qu'au moment où le travail de la première est suffisamment avancé.

A un second commandement, les couvercles des fours de la première série sont tirés en arrière, et les trois volets viennent provisoirement prendre leur place; cette disposition a pour but d'empêcher les ouvriers qui travaillent à dégager les quatre creusets d'une des extrémités, dont on a relevé le volet, d'être trop incommodés par la chaleur rayonnante des creusets adjacents qui, s'élevant de bas en haut, les éprouve particulièrement.

Le troisième commandement est immédiatement suivi de l'enlèvement du creuset. On l'enlève de bas en haut au moyen de fortes pinces et on le place ensuite dans un anneau pratiquée au milieu d'une barre soutenue à chaque extrémité par

un ouvrier. C'est ainsi que le creuset est porté aux entonnoirs décrits ci-dessus.

Malgré les précautions prises, une manœuvre aussi compliquée, à laquelle plus d'un millier d'ouvriers doivent participer, est nécessairement tumultueuse. Nous sommes loin de la cornue Bessemer et des mouvements faciles dont la pression hydraulique l'anime sous la main du chef d'atelier et d'un petit nombre d'auxiliaires.

Cette difficulté des manutentions n'est pas le seul inconvénient des fours à vent ;

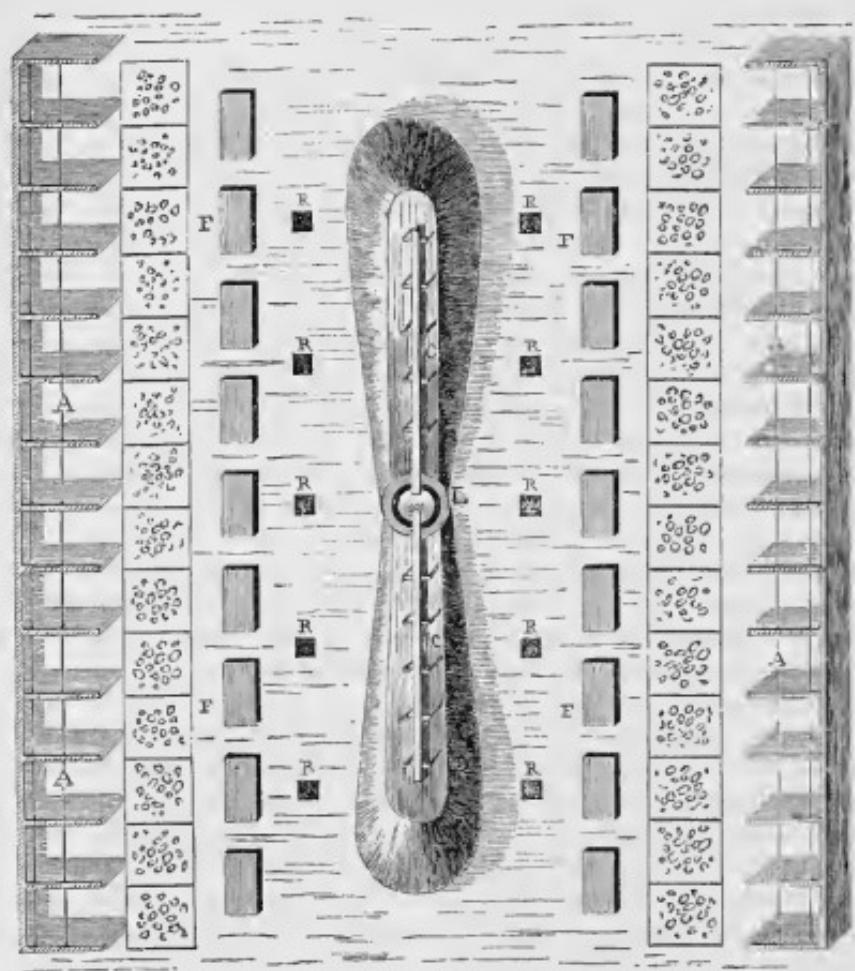


Fig. 30.

ils constituent un appareil peu avantageux au point de vue de la dépense de combustible. La chaleur atteint lentement la charge des creusets; de plus, il s'en perd beaucoup par les maçonneries; mais ce qui nuit surtout à l'effet utile des combustibles, c'est le mode vicieux de combustion auquel oblige ce genre de four. Le coke entoure et couvre les creusets; il y forme une colonne verticale de 0^m,80 à 1 mètre de hauteur lorsque les creusets ont 0^m,50, et de 1 mètre à 1^m,20 pour des

creusets de 0^m,60 à 0^m,70. Dans ces conditions l'acide carbonique, formé dans le bas du four, se transforme en oxyde de carbone dans les régions supérieures. Les fours à vent se rapprochent donc en réalité de gazogènes, mais de gazogènes dans lesquels les produits de la distillation seraient inutilisés. C'est ainsi qu'on dépense 500 kilogrammes de coke pour 100 kilogrammes d'acier fondu, ce qui, comme le fait remarquer Gruner, en égard à la chaleur que possède l'acier fondu, ne représente même pas 2 pour 100 pour l'effet utile de la chaleur dépensée. Il est difficile d'imaginer un appareil de fusion travaillant dans des conditions plus coûteuses.

Au lieu de placer les creusets sur la grille d'un four à vent, on peut les chauffer sur la sole d'un réverbère ou d'un four à gaz ; dans ces conditions, la chaleur est mieux utilisée ; on peut mieux régler la combustion et empêcher la formation d'oxyde de carbone ; outre cela, les creusets, qui sont simplement enveloppés par les flammes, résistent mieux que dans les fours à vent, où les cendres et les mâche-fers s'attachent aux parois extérieures des vases et les corrodent. Gruner, dans son *Traité de métallurgie*, cite comme étant employés dans les usines de MM. Pétin Gaudet des réverbères ordinaires à neuf creusets, dont le foyer est muni d'un ventilateur. Ce foyer reçoit la houille menue au moyen d'une trémie latérale. Dans ces conditions, on ne consommait pour 100 kilogrammes d'acier fondu que 260 à 280 kilogrammes de houille. A Firminy, chez MM. Holzcr, les mêmes creusets chauffés dans un four Siemens, n'exigeaient plus que 180 kilogrammes de houille menue ordinaire. C'est encore une forte consommation, et cela est inévitable à cause du grand volume des fours par rapport à la faible masse de la charge des creusets, néanmoins les avantages des fours à gaz comparés à ceux du four à vent sont assez grands pour faire prévoir, dans un avenir assez prochain, la suppression de ces derniers. Ce qui les défend encore aujourd'hui, c'est la modicité de leur prix et la facilité de leur installation lorsqu'on dispose déjà d'une cheminée à fort tirage, comme c'est le cas dans la plupart des usines métallurgiques.

L'établissement d'un prix de revient moyen, comme nous l'avons fait pour les aciers Martin et Bessemer, ne présenterait pas pour l'acier au creuset le même intérêt. Ce prix varie d'ailleurs beaucoup suivant la nature des matières premières employées, qui sont toujours de premier choix, et suivant le mode de fabrication adopté. Nous nous trouvons aussi en présence de centres de fabrication bien moins nombreux et moins disséminés que dans nos études précédentes. En France, c'est dans le bassin de la Loire, aux environs de Saint-Étienne, que se concentre presque entièrement cette industrie. En Allemagne, le pays de la Ruhr, s'il n'en a pas le monopole, y marche au premier rang, de même qu'en Autriche les usines groupées autour de Leoben en Styrie, approvisionnent toute la monarchie qui, du reste, ne demande plus au creuset que les aciers durs de qualité toute spéciale.

CHAPITRE XV

CÉMENTATION

ours de cémentation. — Conduite de l'opération. — Théorie de la cémentation.

La cémentation est, comme on l'a vu, la plus ancienne des méthodes indirectes de fabrication de l'acier. Elle consiste essentiellement à recarburer le fer en le mettant en contact avec le charbon sous l'influence prolongée d'une haute température. Les matières mises en présence sont toujours chauffées en vase clos, c'est-à-dire préservées par des parois réfractaires et imperméables contre l'action directe des gaz venant du foyer où se produit la chaleur nécessaire à la réaction; et celle-ci d'ailleurs n'est possible qu'en employant des barres de fer de dimensions assez faibles pour qu'elle puisse, de proche en proche, se propager dans toutes leurs parties.

Fours de cémentation. — Le four employé pour la cémentation rentre d'une manière générale dans le type désigné sous le nom de *four à galères*. L'enceinte qui enveloppe les caisses et la chaufse est formée de quatre parois verticales recouvertes par une voûte surbaissée. Dans la partie inférieure de cette construction, et son axe coïncidant avec celui de la voûte, se trouve une grille comprise entre deux banquettes sur chacune desquelles repose la caisse de cémentation qui constitue la partie importante de l'appareil. Cette caisse ne repose pas directement sur la maçonnerie de la banquette, mais sur des briques formant une série de carneaux par lesquels la flamme de la chaufse s'échappe, pour lécher ensuite les parois verticales des caisses et sortir enfin par une cheminée en communication avec la partie supérieure du four.

Les dimensions de l'appareil varient avec l'importance de la production. Le maximum de longueur est ordinairement de 5 mètres. Les deux caisses, larges chacune de 0^m,70 pour que la chaleur puisse pénétrer jusqu'en leur milieu, sont séparées par un intervalle de 25 centimètres; si l'on admet 15 centimètres pour l'écartement de la paroi de chaque côté, on arrive à une largeur totale en œuvre de 2 mètres environ, à laquelle correspond une largeur de grille de 0^m,45. La hauteur des deux caisses peut aller jusqu'à 1^m,90, et la voûte n'est élevée qu'autant qu'il faut pour permettre à l'ouvrier de faire, sans trop de gène, le chargement et le déchargement qui, avec les dimensions indiquées, est pour chacune d'elles d'environ 20 000 kilogrammes.

Les fers les plus recherchés pour la cémentation étaient autrefois les fers

suédois ou russes fabriqués au charbon de bois. Ils se distinguent par une couleur gris-bleuâtre, et rentrent dans la catégorie désignée alors sous le nom de *fers aciéreux*. On emploie comme cément du charbon de bois de chêne, partie à l'état pulvérulent, partie concassé en fragments dont le volume ne dépasse pas 2 centimètres cubes. On a souvent essayé sans succès d'employer comme cément le charbon d'une opération précédente. On peut diminuer un peu la dépense, sans affaiblir sensiblement la propriété carburante du cément, en repassant avec le charbon neuf un quart de charbon calciné. Quant au combustible nécessaire au chauffage des caisses, c'est toujours la houille qu'on emploie.

Conduite de l'opération. — La cémentation devant une opération de moins en moins usitée, nous n'entrerons pas dans le détail du chargement des caisses et de la conduite de l'opération. Celles-ci doivent être hermétiquement fermées, et, s'il importe que la mise en feu soit opérée avec beaucoup de précaution lorsque le fourneau est neuf ou a été réparé, on la pousse au contraire rapidement dans le cas ordinaire, afin de porter aussi vite que possible les caisses à la température rouge à laquelle la carburation se produit. Pour le fourneau que nous avons décrit, la mise au feu dure vingt-quatre heures, et la durée du chauffage est ordinairement de sept jours. On termine l'opération en laissant refroidir l'appareil beaucoup plus lentement qu'on ne l'avait échauffé. A cet effet, on laisse accumuler le combustible sur la grille de manière à la boucher complètement. Le fourneau étant refroidi au-dessous du rouge sombre, on ouvre progressivement les divers orifices pour hâter le refroidissement au moyen de l'air frais. Ordinairement on procéde au désfournement huit jours après qu'on a cessé de fournir le combustible au foyer.

Quellequ'ait été la manière d'opérer, les propriétés physiques du fer sont profondément modifiées par la cémentation. La malléabilité a été complètement détruite ; les barres se brisent quand on les laisse tomber d'une faible hauteur sur l'arête d'une enclume, et on peut les réduire en petits fragments sous le choc d'un simple marteau à main ; ces phénomènes sont bien plus prononcés que ceux qui seraient la conséquence de la teneur en carbone d'acières obtenus par d'autres procédés. De plus, la surface des barres les mieux forgées devient très inégale ; on y remarque de nombreuses ampoules, ce qui a fait donner à l'acier de cémentation le nom *d'acier poule* ; on constate enfin dans la section transversale de nombreuses fissures ordinairement parallèles aux grandes faces de la barre. On comprend donc que l'acier cémenté ne doit être considéré que comme un produit intermédiaire, soit que réduit en fragments plus petits encore, il passe dans le creuset où il donne, après fusion, les aciers les plus fins, soit que soumis à un recuit et à un étirage il soit transformé en barres destinées à la fabrication de divers outils.

Théorie de la cémentation. — Les phénomènes moléculaires qui se produisent pendant la cémentation ont donné lieu à des discussions nombreuses et présentent encore aujourd'hui bien des points obscurs. Il en est de la cémentation comme de la trempe ; on en constate les effets sans pouvoir entièrement les expliquer.

On a reconnu que le fer se carbure très énergiquement en présence du cyanogène, et, comme l'indique M. Fremy, plusieurs corps autres que le charbon peuvent

donner de la dureté au fer ; c'est ainsi qu'il suffit par exemple de frotter une lame de fer chauffée au rouge avec un cristal de ferrocyanure de potassium pour lui donner à la surface la dureté de l'acier. Si, dans un tube de porcelaine, porté à cette même température, contenant un barreau de fer entouré de charbon concassé, on fait passer du gaz ammoniac sec, il se produit une cémentation très rapide. Or l'air atmosphérique, contenant toujours des traces d'ammoniaque plus ou moins fortes, on peut admettre dans les caisses de cémentation la présence de cyanhydrate d'ammoniaque et en outre de cyanures alcalins résultant de la calcination du charbon de bois en présence de l'azote de l'air. Les composés cyanurés doivent donc jouer dans la cémentation un rôle difficilement explicable, mais d'autant plus manifeste que le vieux cément perd complètement son action carburante, ce qui tient à ce que les alcalis fixes ou volatils ne sont plus là pour lui prêter leur concours et servir de véhicule au carbone qui, seul, resterait sans effet.

TROISIÈME PARTIE

CHAPITRE XVI

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR L'EMPLOI DES ACIERS

Fer soudé. — Acier soudé. — Fer fondu. — Acier fondu.

Le premier chapitre de cet ouvrage a fait connaître, en se basant sur des données scientifiques et pratiques, ce qu'il faut entendre par les mots de fer et d'acier. Nous avons montré que l'acier, intermédiaire entre le fer et la fonte, différencié d'abord du fer par sa propriété de prendre la trempe, et de la fonte par sa malléabilité, avait, par suite de l'évolution survenue dans ses procédés de fabrication, singulièrement envahi le domaine des deux produits industriels qui l'encadrent. La confusion était devenue telle, qu'à l'occasion de l'Exposition universelle de 1876, un comité international composé de MM. Lothian Bell pour l'Angleterre, Wedding pour l'Allemagne, Gruner pour la France, Akerman pour la Suède, Tunner pour l'Autriche-Hongrie, enfin, Holley et Egleston pour l'Amérique, fut chargé d'établir une *Nomenclature rationnelle des produits ferreux malléables*. Le problème était bien posé avec un semblable point de départ; les conclusions de la commission furent excellentes, et nous ne pouvons exprimer qu'un regret, c'est que les termes choisis par elle et immédiatement appliqués en Allemagne et en Angleterre ne soient point encore passés dans le langage de nos ingénieurs et de nos industriels, ce qui donne lieu à bien des malentendus.

La commission de Philadelphie a divisé les produits ferreux en quatre grandes catégories :

1^o Ceux qui sont obtenus par la réunion de masses pâteuses, soit par paquetage, soit par tout autre procédé n'impliquant pas la fusion, et qui d'ailleurs ne durcissent pas sensiblement à la trempe; ils portent en allemand le nom de *Schweiss-eisen*, en anglais celui de *Weld-iron*, et devraient porter en français celui de *fer soudé*;

2^o Ceux qui, obtenus également par la réunion de masses pâteuses, prennent la trempe et possèdent ainsi la propriété la plus caractéristique des aciers; leur nom allemand est *Schweiss-stahl*; leur nom anglais *Weld-steel*; le nom en français devrait être *acier soudé*;

3^o Ceux qui, obtenus à l'état fondu, mais ne prenant pas la trempe d'une manière sensible, reçoivent, par une déduction logique, le nom de *Fluss-eisen*, *ingot-iron*, et en français de *fer fondu*;

4^o Ceux qui, obtenus de la même manière que les précédents, c'est-à-dire à l'état fondu, prennent en outre la trempe et sont le *Fluss-stahl*, *l'Ingot steel*, et enfin notre *acier fondu*, dont le sens se trouve à la fois restreint et précisé.

D'après cette classification, l'étude des produits numéro 2 et numéro 4 aurait seule dû rentrer dans le cadre de cet ouvrage; mais comment couper en deux la description de l'opération Bessemer et de la fusion au four Martin; comment s'arrêter dans l'étude de ces procédés juste au moment où le métal cesse de prendre la trempe pour passer de l'acier fondu au fer fondu? En pratique, la transition, nous l'avons vu, est insensible; mais, prise dans ses grands traits, cette classification appliquée aux produits finis présente de réels avantages; c'est ainsi que les dénominations vagues de fers homogènes, aciers doux, aciers extra-doux, devraient être remplacées par celle de fer fondu, auquel, tout en restant en deçà de la trempe, on pourrait demander certaines conditions de résistance et de dureté.

Cet usage n'ayant pas encore prévalu, nous sommes conduits, pour réaliser notre programme, à faire rentrer sous le nom usuel d'acier les produits numéros 2, 3 et 4 de la commission de Philadelphie, et dans ce sens on peut dire que les aciers sont susceptibles de tous les emplois auquel le fer était reconnu propre précédemment. Il n'est pas, nous ne craignons point de l'affirmer, un seul produit obtenu autrefois en *fer soudé* qui ne puisse être aujourd'hui obtenu avec avantage en *fer fondu* choisi d'une manière convenable.

La seule supériorité que paraisse avoir enceore aujourd'hui le fer soudé, c'est celle que son nom indique, c'est la *soudure*; mais cette supériorité est plus apparente que réelle, en ce sens que la soudure des fers fondues se généralisera de plus en plus. Elle doit être faite autrement que celle du fer. Elle est peut-être moins facile à obtenir; mais elle pénétrera de plus en plus dans la pratique journalière des ateliers, parce que la fabrication du fer fondu est supérieure à tant d'égards à celle du fer puddlé qu'elle finira par remplacer entièrement cette dernière. Une autre circonstance l'y aidera, c'est le perfectionnement des engins mécaniques qui permettent de donner aux pièces leurs formes même compliquées, par compression, étampage, découpage ou autres moyens appropriés. Qui s'inquiète aujourd'hui de savoir si le métal le plus propre à la fabrication des bandages des chemins de fer est soudable? Ce qu'on lui demande, c'est la résistance à l'usure, jointe à l'élasticité. Pourquoi? Parce qu'une disposition ingénieuse du laminoir a permis de laminer directement le bandage sans soudure et de supprimer ainsi un point

de la surface de roulement qui restait toujours défectueux. Il en sera ainsi pour bien d'autres produits façonnés dans lesquels le fer soudé est, par suite d'errements anciens, principalement employé aujourd'hui.

Envisagé ainsi, notre sujet serait bien vaste, et nous devrons nous borner plutôt à des indications générales qu'à une description trop détaillée des forges et des lamoins. Cette dernière étude est pleine d'intérêt, et ne nous paraît pas avoir été faite depuis longtemps avec le développement qu'elle comporte ; mais elle serait mieux à sa place dans une Encyclopédie mécanique que dans une Encyclopédie chimique. Nous nous bornerons donc à étudier dans un premier chapitre, qui sera le XVII^e de l'ouvrage, le travail de dégrossissage de l'acier par les marteaux, les laminoire et les presses hydrauliques, ayant surtout en vue la fabrication des demi-produits. Passant ensuite à la fabrication des produits finis, nous réunirons dans un même chapitre, qui sera forcément un peu volumineux, tout ce qui concerne la fabrication des produits finis destinés aux chemins de fer ; le chapitre suivant comprendra le même travail pour les services de la guerre et de la marine ; enfin, le dernier chapitre réunira, autant que possible, tout ce qui concerne l'acier dans ses autres utilisations industrielles.

CHAPITRE XVII

DEGROSSISSEMENT DES ACIERS

Marteaux. — Laminoirs. — Presses hydrauliques. — Fours de réchauffage.

L'acier brut sort presque toujours des ateliers qui le produisent sous forme de lingots dont les dimensions varient, nous l'avons vu, entre des limites très considérables. Les canons des plus gros calibres exigent, comme point de départ de leur fabrication, des lingots dépassant souvent 100 000 kilogrammes, dont le transport et la mise en œuvre ne constituent pas une moindre difficulté que leur coulée elle-même. La vue de ces gros lingots sur le wagon-truc de construction spéciale qui les supporte a été une des attractions métallurgiques des expositions nationales ou universelles de ces derniers temps. On cherche au contraire, pour fabriquer les petites barres rondes ou carrées, à partir de lingots présentant une section aussi réduite que possible, de manière à diminuer, autant que faire se peut, le prix de revient de la transformation.

Comme il y a gros lingots et petits lingots, il y a aussi gros marteaux et petits marteaux, gros laminoirs et petits laminoirs, qui ne diffèrent pas seulement par leur forme, mais aussi par leur fonctionnement et par leur mode de construction que nous allons rapidement étudier.

Marteaux. — Nous ne parlerons ici que pour mémoire du marteau à main, que chacun a vu employer maintes fois ; nous ne nous arrêterons pas non plus aux *martinet*s ou *marteaux à queue* consistant en un fort madrier mobile autour d'un axe de rotation, et dont une des extrémités porte le marteau, tandis que l'autre peut être soumise à l'action de came(s) qui produisent le mouvement alternatif nécessaire à la marche de l'appareil. Ces *martinet*s qu'on rencontre encore fréquemment dans les pays de montagnes où des chutes d'eau permettent de les faire marcher économiquement au moyen de roues hydrauliques, ne comptent plus guère dans la grande industrie où le *marteau-pilon*, mis en service pour la première fois vers 1840, est employé à peu près exclusivement. Cet appareil, dont le fonctionnement est également bien connu, consiste en un cylindre à vapeur placé verticalement au-dessus de l'enclume et porté par deux montants latéraux qu'on faisait en fonte autrefois, mais qu'on construit maintenant en tôle pour éviter les ruptures. Un piston se meut dans ce cylindre et soulève une masse de forme parallélépipédique constituant le marteau proprement dit, et guidée dans son ascension et dans sa descente par des coulisses verticales fixées aux montants qui supportent le cylindre. Quant à l'admission de la vapeur qui, en pénétrant sous le piston, détermine la levée du marteau et sa chute lors de son expulsion, elle s'opère au moyen d'un tiroir analogue à celui de toutes les machines à vapeur, mais qui, au lieu d'être mû automatique-

ment par un excentrique, est manœuvré à la main, conformément aux indications du marteleur qui conduit l'opération. Lorsque la vapeur est admise seulement sous le piston et que le marteau retombe par son propre poids, il est à simple effet; il est au contraire à double effet lorsque la vapeur est admise sur la face supérieure du piston et que sa pression s'ajoute à l'action de la pesanteur pour déterminer le choc final. Dans ce cas, le coup est plus sec, plus vigoureux, et l'on peut, pour un même effet utile, employer des appareils plus petits.

L'effet utile d'un marteau-pilon dépend non seulement de son poids, mais encore de la hauteur dont il retombe. Le maximum de cette *hauteur de chute*, qui correspond au maximum de longueur du piston, est généralement supérieur à 1 mètre, et atteint plusieurs mètres dans les appareils de grande puissance construits dans les derniers temps.

Les marteaux-pilons présentent, avons-nous dit, des dimensions très variables; on les classe d'après le poids de la masse soulevée. Les marteaux de 5 à 5 tonnes sont nombreux et se rencontrent dans toutes les forges qui élaborent des pièces d'acier même de modestes dimensions. Les marteaux de 12 à 15 tonnes deviennent déjà plus rares, et servent à l'ouvrage des arbres de transmission, des essieux de chemins de fer. Les marteaux de 25 tonnes constituent déjà l'outillage des grandes usines, et le marteau de 50 tonnes de l'établissement Krupp, à Essen, avait été considéré longtemps comme le dernier mot de ce genre de construction.

Le Creusot présentait, à l'Exposition de 1878, le spécimen en vraie grandeur d'un marteau de 80 tonnes réellement monté dans ses ateliers. Nous en donnerons la description avec quelques détails pour montrer à quelle puissance les engins métallurgiques peuvent arriver aujourd'hui.

Le marteau du Creusot est renfermé, avec les fours et les grues qui le desservent, dans une halle de 50 mètres de longueur, 35 mètres de largeur et 17 mètres de hauteur au-dessous des fermes; la surface couverte est ainsi de 1750 mètres carrés.

Les fondations consistent en un massif en maçonnerie de 600 mètres cubes s'appuyant sur le rocher, qu'on est allé chercher à 11 mètres de profondeur au-dessous du sol et d'une chabotte en fonte de 720 tonnes, formée de six assises horizontales reposant l'une sur l'autre par l'intermédiaire de faces rabotées. Ce poids correspond à une hauteur totale de 5^m, 60 et à une surface de 55 mètres carrés à la base et de 7 mètres carrés au sommet.

Le marteau proprement dit se compose des jambages, hauts de 10^m, 50, pesant avec les plaques de fondation, les plaques d'entretoisement et les glissières, 365 tonnes. Ils supportent un entablement pesant 30 tonnes et sur lequel est placé un cylindre à vapeur composé de deux tronçons, échancré de 5 mètres, assemblés à brides et à boulons. Le diamètre du cylindre est de 4^m, 90, d'où résulte sous le marteau, avec de la vapeur à 5 atmosphères, une pression de 140 tonnes environ. Comme le poids de la masse active à soulever est seulement de 80 tonnes, on voit que l'on pourrait encore augmenter le poids du marteau.

La hauteur totale de l'appareil, comptée à partir de la plaque de fondation jusqu'au-dessus du cylindre, est de 18^m, 60, et si l'on y ajoute la hauteur de la partie souterraine, on arrive pour l'ensemble au chiffre énorme de 30 mètres, avec un poids total de 1280 tonnes.

Les marteaux-pilons de dimensions modérées sont employés à la fabrication des pièces de forme ronde tels qu'essieux, arbres de transmission, etc. Ils fournissent aussi à divers constructeurs des demi-produits de section carrée désignés sous le nom de brames et qui sont susceptibles de nombreux emplois. Ceux qui viennent après servent au martelage de ce qu'on appelle la grosse pièce mécanique, comme les bielles, les manivelles, les essieux coudés des grosses machines à vapeur et surtout des machines marines.

Le marteau géant du Creusot a été principalement construit pour le forgeage des gros lingots à canons et des plaques de blindages pouvant présenter les grandes épaisseurs qu'on leur demande aujourd'hui.

Laminoirs. — Henry Cort, l'inventeur du four à puddler, passe également pour avoir été le premier à substituer l'étirage en cannelures à l'étirage au marteau. Appliqué en Angleterre dès 1785, ce ne fut guère qu'en 1815 que le laminoir fit son apparition en France.

On entend aujourd'hui par *train de laminoir* l'ensemble formé par deux cylindres horizontaux tournant ensemble et en sens inverse entre deux supports verticaux sur lesquels ils s'appuient chacun par leurs deux extrémités. La partie des cylindres comprise entre les montants se nomme la *table*; la partie qui, de chaque côté, repose sur les coussinets des supports, se nomme le *tourillon* ou le *collet*; celle qui suit et sert à l'accouplement du cylindre avec le moteur, se nomme le *trèfle*. Cet accouplement s'opère d'ailleurs au moyen d'une pièce spéciale portant le nom de *manchon*.

La table du cylindre peut avoir une forme absolument cylindrique, autrement dit la génératrice peut être une ligne droite; c'est le cas pour le laminage de la tôle; mais le plus souvent cette génératrice est formée par une ligne brisée présentant des saillants et des rentrants. Ces saillants et ces rentrants, mis en regard l'un de l'autre, dans les deux cylindres superposés, forment ce qu'on appelle les *cannelures* des laminoirs. C'est un cas fort rare qu'il faille plus de deux cylindres pour former une cannelure; cependant dans le laminage des tuyaux minces une scule et même cannelure est formée par quatre cylindres conjugués travaillant ensemble. Ce sont là des anomalies auxquelles nous ne nous arrêterons pas.

Une même paire de cylindres présente ordinairement plusieurs cannelures, soit pour fabriquer plusieurs profils différents, soit pour amener, par des passages successifs, la barre métallique à la forme définitive qu'on a en vue. Dans aucun cas il n'y a de liaison entre les cannelures qui se suivent; il doit donc se trouver entre elles une interruption dans la table, avec la forme d'une saillie annulaire que l'on appelle *cordon* ou *fausse cannelure*. De même aux deux extrémités de la table, pour limiter les cannelures extrêmes, doit se trouver un cordon terminal.

Les lecteurs qui désireraient entrer plus avant dans cette étude un peu spéciale trouveront des renseignements intéressants dans un mémoire publié par M. Gautier dans le *Bulletin de la Société de l'industrie minérale*, en utilisant un travail considérable de Tunner sur le tracé des cylindres pour le laminage du fer. Les cannelures y sont classées d'après la manière dont elles sont formées par les deux cylindres superposés; puis, d'après la forme de leur section, enfin d'après leur manière de faire le travail. On distingue dans le premier cas les cannelures *ouvertes*, *fermées*, de

champ, etc. ; dans le second, les cannelures *ogives*, *plates*, *polygonales*, *profilées*, etc. ; enfin le mode de travail fournit les cannelures *soudantes*, *élargisseuses*, *finisseuses*, etc.

Toute cette nomenclature s'applique non seulement à la disposition formée par deux cylindres, mais encore à l'agencement à trois cylindres qui a reçu le nom de *trio*. Dans ce cas, les cannelures sont formées par le cylindre du milieu et les deux cylindres qui l'encadrent, et l'on peut ainsi utiliser tous les passages de la barre, tandis qu'avec deux cylindres, l'entrainement de la barre ne pouvant se faire que dans un sens, son retour après l'étirage dans la cannelure doit se faire à vide et sans aucun effet utile produit. Les trios permettant ainsi de faire à peu près un travail double avec la même main-d'œuvre, devraient être presque exclusivement employés, mais ils ont l'inconvénient d'exiger une installation plus coûteuse et d'immobiliser un plus grand nombre de cylindres ; aussi a-t-on cherché à éviter le retour à vide par une autre disposition qui consiste à changer avec chaque passage le sens de rotation des cylindres, de manière à permettre d'engager la barre des deux côtés. Cette manière d'opérer, qui entraîne nécessairement une perte de temps au moment du *changement de marche*, ne peut s'appliquer évidemment qu'à des laminoirs marchant à une vitesse relativement faible et élaborant de grosses pièces ; mais alors on a l'avantage de pouvoir opérer tout le laminage sans être obligé de les soulever.

Les cylindres de laminoirs sont, comme on l'a vu, animés d'un mouvement de rotation qui peut leur être transmis de la manière la plus simple par la bielle et la manivelle d'une machine à vapeur. Les cylindres peuvent être, pour nous servir d'une expression usuelle, attaqués directement par la machine, ou bien mis en mouvement au moyen d'engrenages plus ou moins multipliés. On préfère l'attaque directe lorsque la vitesse à donner aux cylindres le permet, c'est-à-dire ne dépasse pas cent tours par minute ; au delà de cette vitesse, les engrenages doivent être utilisés ; dans ces derniers temps, on les remplace par des courroies ou des câbles dans les trains servant à la fabrication du produit désigné sous le nom de *machine* et qui constitue la matière première des tréfileries ; les cylindres de ces laminoirs font plusieurs centaines de tours à la minute, et les pistons des machines à vapeur ne peuvent les suivre dans cette voie.

Nous ne saurions entrer ici dans les détails de construction des machines motrices par lesquelles les cylindres de laminoirs sont actionnés. Elles rentrent presque toutes dans le type des machines horizontales soit à un cylindre, soit à deux cylindres conjugués. Munies de puissants volants dont le poids dépasse souvent 50 tonnes, faisant un large emploi des appareils de détente et de condensation les plus perfectionnés, elles atteignent aujourd'hui jusqu'à 2000 et même 2500 chevaux. Les aciéries de *Longwy*, qui sont de construction récente et ont pu par suite mettre à profit les derniers perfectionnements, présentent de beaux spécimens de ces puissants moteurs pour le laminage de l'acier. Pour le laminoir comme pour le marteau, les engins de fabrication croissent et se transforment ; les trains employés au laminage des petits profils, qui se contentaient autrefois d'un moteur de 50 chevaux, demandent maintenant des machines d'une force décuple pour arriver à une production économique qui seule permet d'affronter victorieusement la concurrence.

Pour rentrer plus directement dans notre sujet, nous devons examiner quelles

sont les dispositions spéciales à prendre pour laminer soit en acier fondu, soit en fer fondu, les produits obtenus autrefois au moyen de paquets, c'est-à-dire de barres de fer puddlé rapprochées les unes des autres pour être définitivement réunies par la soudure. La structure des deux pièces à laminer va nous l'indiquer. Tandis que le paquet ferreux présente dans l'intervalle des mises de nombreux vides, et que ces mises elles-mêmes, pour être soudées, doivent être chauffées à une température qui les rapproche de l'état pâteux, le lingot d'acier est un solide homogène présentant, comme on l'a vu, quelques cristallisations anormales, mais bien plus apte, en tous cas, à résister à des efforts de compression et d'étrage que le paquet de fer puddlé, ayant la même forme et les mêmes dimensions. Dans les premières cannelures le paquet laisse écouler des scories presque liquides, tandis que le lingot se dépouille tout au plus d'une légère croûte d'oxyde formée à sa surface pendant un réchauffage qui doit toujours être mené prudemment; il en résulte que le fer soudé peut supporter des pressions plus fortes que le fer fondu, et que, pour le premier, la décroissance des cannelures, c'est-à-dire la diminution successive de leur section, peut être plus grande que pour le second. La même règle doit être observée pour le fer fondu par rapport à l'acier fondu, chez lequel, à l'homogénéité physique s'ajoute la dureté résultant de la composition chimique; il est évident que pour les produits finis, exigeant l'emploi d'une semblable matière, la décroissance des cannelures doit être réduite au minimum. L'acier présente en outre, par rapport au fer, cette particularité qu'il ne s'étend que peu latéralement; les cannelures successives ne peuvent donc présenter beaucoup d'élargissement. Il ne supporte que peu de pression latérale, et par suite on ne peut lui donner en largeur ce qui lui manque en hauteur. Si donc, dans une partie d'une cannelure, on exerce une pression beaucoup plus grande que dans les autres parties, cela n'a pas pour effet, comme pour le fer, de transporter la masse d'un côté vers l'autre, mais la partie la plus fortement tendue entraîne avec elle le reste de la section, et celle-ci devient plus faible que les dimensions de la cannelure, qui alors ne se remplit pas entièrement. Par suite, lorsque les cannelures ne sont pas rigoureusement tracées dans les rapports voulus, il se produit des tensions aussi nuisibles au travail du laminage qu'à la qualité du produit fini, et il faut, pour l'acier, passer plus insensiblement de la section carrée au profil désiré. Les dernières cannelures doivent tout spécialement produire une pression égale dans toutes leurs parties.

Ce que nous venons de dire ne s'applique, bien entendu, qu'aux cannelures profilantes. Lorsqu'il s'agit de ramener des lingots de grosse section à des barres carrées qui, sous le nom de blooms, constituent un produit marchand susceptible de nombreux emplois, la décroissance des cannelures peut être rapide, et c'est là que les puissants laminoirs de 2000 chevaux, dont nous avons parlé plus haut, trouvent leur utile application. Il ne s'agit pas ici de profiler, mais de soumettre le lingot à une compression énergique qui, comme on l'a vu, augmente singulièrement la qualité du métal dont il est coulé.

Presses hydrauliques — Les innombrables emplois de la presse hydraulique dans les arts industriels sont trop connus pour que nous ayons à faire ici la description de cet appareil qui n'a peut-être pas été jusqu'à présent utilisé dans les établissements métallurgiques autant qu'il le mériterait. La presse hydraulique, par

son travail lent, mais puissant et régulier, est un excellent appareil de forgeage, et pour des lingots de fortes dimensions, les services qu'elle peut rendre sont incontestables ; mais, dans ce cas, les pompes destinées à la compression de l'eau doivent être elles-mêmes actionnées par des machines à vapeur, ce qui rend l'appareil un peu compliqué. La première presse hydraulique à forger a été installée en 1861, à Vienne, dans les ateliers de construction de la société autrichienne des chemins de fer de l'État, par M. Haswell, alors directeur de cet établissement, et elle a été depuis lors constamment utilisée pour la fabrication de nombreuses pièces entrant dans la construction des locomotives, telles que boîtes à graisse, têtes de bielles, manivelles, plaques de garde, étriers de ressorts, etc. L'Exposition universelle de 1878 montrait, en même temps que les dessins à grande échelle de ce puissant engin, une collection de pièces provenant de cette fabrication.

Fours de réchauffage. — Quel que soit l'appareil employé pour le façonnage des fers et aciers fondus, il est nécessaire de les amener au rouge dans des fours dont la forme et les dimensions varient nécessairement avec celles des lingots à réchauffer, mais qui rentrent tous dans la catégorie des fours à réverbère, soit à grille ordinaire, soit avec gazogènes et régénérateurs Siemens.

Malgré les avantages incontestables que présente ce dernier système, il n'est pas le plus employé, parce que la flamme perdue des fours ordinaires peut être aussi utilement conduite sous des chaudières donnant la vapeur nécessaire au fonctionnement des laminoirs et des marteaux.

Nous citerons comme spécimen de fours des plus grandes dimensions ceux qui desservent au Creusot le marteau-pilon de 80 tonnes déjà décrit. Ils occupent chacun, avec leurs régénérateurs, un espace de 7^m,80 de long sur 3^m,60 de large et 10 mètres de hauteur totale. Le laboratoire présente 4^m,50 sur 3^m,40, avec 2^m,60 de hauteur sous voûte. La porte d'introduction a 3^m,50 de longueur sur 2^m,50 de hauteur, et est manœuvrée par un appareil hydraulique servant également à mettre en mouvement les quatre grues qui portent des fours au marteau les énormes pièces à travailler. Trois de ces grues ont une puissance de 100 tonnes, et la force de la quatrième a été portée à 160 tonnes. Leurs poids respectifs sont de 110 et de 140 tonnes.

Nous ne saurions terminer ce rapide aperçu, consacré aux appareils de réchauffage, sans insister sur les avantages que présenterait un démoulage et un transport assez rapide des lingots, pour permettre de les passer directement de la lingotière au laminoir sans être obligé de les réchauffer. C'est un but vers lequel on tend dans toutes les usines où la forge est voisine de l'atelier Bessemer ; dans quelques établissements où cette distance atteint plusieurs centaines de mètres, on prend le soin de charger les lingots encore rouges dans des wagonnets fermés et garnis intérieurement de briques réfractaires. Un ingénieur anglais, M. John Gjers, a eu l'idée ingénieuse, dont il a fait part au congrès de l'*Iron and Steel Institute* de 1882, d'introduire les lingots en attendant que le laminoir puisse les recevoir, dans de petits puits rectangulaires également garnis de briques réfractaires et présentant une section très peu différente de celle du lingot lui-même, qui peut ainsi conserver sa chaleur et même la céder en partie au lingot qui le suit, lorsque celui-ci arrive un peu plus froid par suite d'un retard dans les manœuvres.

CHAPITRE XVIII

EMPLOI DE L'ACIER PAR LES CHEMINS DE FER

Rails. — Petit matériel d'attache. — Traverses métalliques. — Matériel fixe de la voie.
Bandages. — Essieux. — Ressorts. — Moulages en acier.

Les chemins de fer sont, comme leur nom l'indique, les plus grands consommateurs des produits en fer et en acier. Ce sont eux qui ont donné naissance à la grande industrie métallurgique, et lorsque, pour une raison quelconque, leur construction vient à s'arrêter ou leur entretien à se restreindre, il en résulte pour les usines, grandes ou petites, un malaise qui dégénère bientôt en une crise si l'interruption des commandes se prolonge au delà d'un certain temps. Les usines, au contraire, sont pour les chemins de fer un précieux élément de prospérité par les transports qu'elles leur apportent. Il faut encore aujourd'hui, pour obtenir une tonne de produit fini, transporter cinq ou six tonnes de matières premières, houilles et minerais, et souvent, comme nous l'avons vu, l'une ou l'autre de ces matières parcourt sur rails plusieurs centaines de kilomètres avant d'arriver à sa destination. Il existe donc entre ces deux auxiliaires du progrès industriel une solidarité sur laquelle il est inutile d'insister plus longtemps.

§ I. — RAILS

Nature et qualité du métal à employer. — Les rails sont incontestablement, au point de vue du tonnage, l'article le plus important du matériel des chemins de fer. La substitution, pour leur fabrication, du métal fondu au métal soudé, a constitué un progrès qui, contesté à l'origine, ne trouve plus de contradicteur aujourd'hui. Le rail en fer paqueté des anciens temps n'existe plus même sur les chemins secondaires les plus modestes, et dans les mines elles-mêmes le métal homogène, laminé sous une forme rationnelle, se substitue de plus en plus à la barre en fer qu'on y rencontrait précédemment.

Par contre, les avis diffèrent encore aujourd'hui sur deux points importants, à savoir sur le profil à donner au rail et sur le degré de dureté que doit présenter le métal employé. La première question est moins de notre domaine; nous devons pourtant indiquer que le rail Vignole, exclusivement employé dans toute l'Allemagne, l'Autriche, la Hongrie, la Roumanie, etc., se partage en parties à peu près égales le territoire français, et n'a que peu pénétré en Angleterre. On verra plus

loin que la nature de l'acier à employer est dans une certaine mesure en corrélation avec les profils que l'on se propose d'adopter.

La question de la dureté du métal doit, au contraire, nous arrêter plus longtemps. Elle a donné lieu à de nombreux travaux. On avait longtemps admis que les rails doux présentaient de plus grandes garanties au point de vue des ruptures, mais devaient, par contre, être soumis à une usure plus rapide, lorsque les travaux de Dudlay en Amérique et de Gruner en France cherchèrent à démontrer que les aciers doux, loin de s'user plus rapidement, présentaient aussi, sous ce rapport, des avantages ignorés. M. Cazes, au contraire, dans un mémoire publié en 1885 par la *Revue générale des chemins de fer*, donne la préférence aux rails durs employés sur le réseau du Midi français, au double point de vue déjà signalé.

Sans vouloir trancher ici une question au sujet de laquelle des arguments sérieux ont été apportés de part et d'autre, il sera peut-être bon de rappeler que la dureté du métal fondu dépend non seulement de sa composition chimique, mais encore des opérations mécaniques auxquelles il a été soumis. Si l'on veut bien se souvenir de ce que nous avons dit sur l'écrouissage, on concevra sans peine qu'un même acier coulé en deux lingots, l'un de 0^m,20 et l'autre de 0^m,40, laminés, le premier dans la cannelure d'un laminoir de 100 chevaux, tandis que l'autre aura été soumis à l'action d'un cylindre mû par une force triple ou quadruple, présenteront, au point de vue des diverses résistances, des qualités très différentes qui seront naturellement à l'avantage du métal provenant du second lingot. Un acier n'ayant qu'une faible teneur en éléments durcissants pourra résister remarquablement à l'usure, si son grain a été resserré par des compressions énergiques, causant une sorte de trempe comme celle que M. Clémendot réalise dans des conditions analogues. Nous nous associons donc pleinement aux observations de M. Cazes lorsqu'il dit que, pour arriver à des conclusions définitives sur cette importante question, il est nécessaire de grouper des observations nombreuses, choisies, de manière à éliminer du résultat moyen observé les influences dues à l'ensemble des causes physiques. C'est ainsi qu'il faudrait pouvoir comparer des rails obtenus dans une même usine en partant de lots de fusion identiques, au moyen de lingots de dimensions constantes, chauffés par les mêmes ouvriers, dans les mêmes fours, passés aux mêmes cannelures, refroidis et ajustés de la même manière. En comparant alors, non pas pour quelques rails seulement, mais pour des séries nombreuses, classées avec soin d'après leur composition chimique, les usures moyennes constatées dans des conditions identiques de travail dans les voies, on obtiendra des résultats dont les variations pourront être considérées comme correspondant aux seules variations des compositions chimiques. On ne peut, comme on sait, résoudre une équation renfermant plusieurs inconnues, et dans la pratique industrielle on est trop souvent porté à l'oublier.

Quoi qu'il en soit, il est admis aujourd'hui que l'acier des rails à double champaignon peut, sans inconvénient, être plus dur que celui des rails Vignole. Le profil de ce rail détermine en effet très facilement la trempe des bords du patin, et l'existence dans les diverses parties de la section de tensions moléculaires irrégulières, préjudiciables, comme on sait, à la résistance des métaux fondus. C'est là, ce nous semble, une des raisons qui ont conduit plusieurs compagnies à conserver le

rail à double champignon malgré la dépense plus considérable qu'il occasionne et l'infériorité théorique apparente due à son profil.

Les conditions climatériques ne sont pas sans exercer non plus une influence sur le métal à choisir. En Russie, en Suède, en Allemagne, on prend de préférence, pour les rails, le numéro 6 de l'échelle de Tunner correspondant, comme on sait, à une teneur en carbone de 0,50 pour 100 et à 50 kilogrammes de résistance à la rupture. En France, nous voyons la teneur en carbone s'élever et atteindre à la compagnie du Midi, avec le rail à double champignon, il est vrai, une teneur moyenne de 0,60 de carbone. La teneur moyenne de 0,45 est celle qui a paru la plus convenable à un grand nombre de chemins.

Laminage des rails. — Soit qu'on adopte le profil à double champignon ou le profil à patin, le rail, comme toutes les pièces exigeant une grande longueur avec une faible section, se présente essentiellement comme un produit laminé. La pratique qu'avaient autrefois quelques usines de marteler les lingots a été abandonnée comme inutile et coûteuse. Le progrès a consisté à augmenter le diamètre des cylindres et à les disposer de manière à pouvoir laminer en une seule fois des barres ayant jusqu'à 20 et 50 mètres de longueur, et pouvant alors donner rapidement et avec un très petit déchet, par un sciage à chaud, deux ou trois rails suivant que ceux-ci doivent avoir 6, 8 ou 10 mètres de longueur. Parmi les appareils les plus complets dans ce genre, il faut citer le laminoir réversible, composé d'un double train, l'un de dégrossissage et l'autre de finissage, exposé à Paris en 1878, par l'usine de Seraing et employé depuis par divers établissements. Dans cette belle installation, chaque train est commandé par une machine horizontale à deux cylindres couplés, sans volant, actionnant un même arbre de transmission et pouvant, par une coulisse de changement de marche, renverser son mouvement à chaque passage de la barre dans le laminoir. Au train dégrossisseur, composé d'une seule cage, et où la vitesse du train doit être réduite, l'arbre de la machine motrice porte un pignon commandant un engrenage calé sur l'axe du cylindre laminoir inférieur, mais au train finisseur, composé de deux cages, l'arbre même de la machine est sur l'axe des laminoirs inférieurs, qu'il conduit directement, faisant pour chaque passage un nombre de tours correspondant à la longueur de la barre. Les cylindres finisseurs sont disposés de manière à lâcher la barre finie au niveau du sol; elle court alors sur des galets mis mécaniquement jusqu'aux scies qui la découpent. La force de chaque machine, pourvue d'un système de détente et de condensation, est de 500 chevaux, et l'on conçoit qu'on puisse arriver ainsi à une production de 2000 tonnes par semaine, avec une dépense de main-d'œuvre et de combustible qui paraît insignifiante si on la compare à celle des anciennes installations.

Le nombre des cannelures par lesquelles un rail doit passer pour arriver à son profil définitif, dépend nécessairement de la section de lingot de laquelle on part, de la forme plus ou moins compliquée du profil, et enfin de la puissance du laminoir. On peut citer comme exemple le travail de l'usine de Prévali, en Carinthie, où, en partant de lingots à pans coupés de 0^m,20 de côté, on faisait usage de quinze cannelures correspondant à vingt passages, la barre passant trois fois dans la première cannelure et deux fois dans les deux suivantes. Ces passages successifs dans une même cannelure sont assez fréquents; ils permettent de mieux utiliser la longueur

de table du cylindre; mais pour cela il faut écarter légèrement le cylindre supérieur et le rapprocher successivement, la barre étant retournée à chaque passage de 90 degrés.

A Prévali, après les sept passages en trois cannelures, le laminage se poursuivait régulièrement à travers la série des cannelures profilantes, parmi lesquelles la deuxième, la cinquième et la huitième étaient des cannelures de champ, dans lesquelles le rail est passé verticalement de manière à déterminer sur la tête une compression qui, dans les autres cannelures, ne se produit que d'une manière imparfaite.

L'usine de Reschitz possède un train de rails reconstruit en 1875, sous forme d'un trio à trois cages, la première servant au dégrossissage, la seconde et la troisième au finissage du lingot qui, coulé pour deux rails, a 0^m,51 à la base, 0^m,27 au sommet, et pèse environ 600 kilogrammes. Le dégrossissage se fait par 10 passages en 8 cannelures, et pour le profilage on fait de 10 à 15 passages, suivant le profil à laminer. Le diamètre des cylindres est de 0^m,70; ils sont animés d'une vitesse moyenne de 40 à 45 tours au dégrossissage, et de 65 à 70 tours au finissage, par une machine horizontale à un seul cylindre de 1^m,10 de diamètre et 1^m,57 de course actionnant un volant de 40 tonnes et fournissant une force de 600 chevaux. Le laminage d'une barre pour deux rails de 9 mètres se fait en une seule chaude, et le rail fini est conduit, comme à Seraing et comme dans la plupart des nouvelles installations, à la scie circulaire par des rouleaux placés au niveau du sol et mis en mouvement au moyen de la machine motrice de la scie elle-même. L'atelier d'ajustage se trouvant dans le prolongement de ces appareils, le rail suit une ligne droite depuis le four à réchauffer jusqu'à la plaque de réception.

Les lingots, lorsqu'ils sont réchauffés, subissent un certain déchet résultant de l'oxydation de leur surface; des pellicules d'oxyde de fer se détachent sous le laminoir et rentrent du reste dans le roulement du haut fourneau; ce déchet peut être évalué à 4 ou 5 pour 100; les bouts de rails enlevés à la scie représentent aussi 5 à 7 pour 100 du poids total du produit fini; enfin, quels que soient les soins pris dans toute la série des opérations, une proportion assez variable des rails laminés doit être rebutée par suite de pailles ou de criques qui se manifestent soit sur le chapeau, soit sur le patin. La perte résultant de ces causes réunies ne peut, dans une fabrication bien ordonnée, être évaluée à moins de 10 à 12 pour 100, et ce chiffre était autrefois beaucoup plus considérable.

Le rapport entre le poids du combustible dépensé et celui du rail fabriqué en partant du lingot, donne également lieu à des constatations intéressantes. C'est du reste dans toutes les opérations métallurgiques un des éléments caractéristiques des conditions de la fabrication, et tous les efforts tendent à réduire ce rapport autant que possible. Dans une notice publiée lors de l'Exposition de 1878, l'usine de Seraing indiquait comme poids de charbon dépensé pour la production de vapeur nécessaire au laminage d'une tonne de rails entièrement finis, le chiffre de 118 kilogrammes. En y ajoutant un chiffre égal pour le poids du combustible employé au réchauffage et qui concourt aussi à la production de la vapeur, on arrive à une dépense totale d'environ 250 kilogrammes. Ce sont là des résultats très satisfaisants, et bien des laminoirs travaillent encore aujourd'hui dans des conditions moins avantageuses.

On peut voir par ce qui précède que le prix de revient des rails d'acier varie entre de larges limites. Nous avons souvent entendu invoquer par des métallurgistes distingués une formule d'après laquelle le prix de revient du rail fini serait à peu près exactement le double du prix de la fonte employée à sa fabrication. C'est ainsi que la fonte introduite dans le convertisseur Bessemer coûtant 60 francs, le rail sortant de la dernière machine-outil qui concourt à son ajustage reviendrait à 120 francs. D'autres ingénieurs admettent qu'avec un outillage bien entendu, le prix de transformation du lingot en rail ajusté est de 50 francs; nous avons vu d'autre part que la dépense de transformation de la fonte en lingot brut peut être évaluée actuellement à 25 francs environ. Nous retombons de cette manière sur les résultats de la première formule, qui se trouve ainsi suffisamment vérifiée.

Ajustage des rails. — Le rail sortant du laminoir doit, pour devenir un produit marchand, être soumis à diverses opérations mécaniques. La première consiste en un dressage à froid qui a pour but de lui donner l'horizontalité parfaite nécessaire à la bonne assiette de la voie; vient ensuite la mise à longueur définitive, qui doit être faite à la fraise ou tout autre outil aussi exact, de manière à obtenir des sections parfaitement planes et d'équerre sur l'axe du rail; les arêtes vives sont ensuite enlevées à la lime. On procède enfin au perçage des trous servant à l'éclissage, opération pour laquelle on employait autrefois le poinçon, et qui maintenant se fait toujours à la mèche pour éviter les phénomènes moléculaires sur lesquels l'attention a été appelée dans la première partie de ce travail. Cette série d'opérations paraît compliquée au moins dans son énoncé; elle exige dans les usines un emplacement assez considérable; mais, lorsque les manutentions sont bien entendues et qu'on dispose de machines-outils bien construites, le finissage des rails ne représente dans leur prix de revient qu'une dépense insignifiante.

Epreuves de réception des rails. — Les conséquences fatales que peut avoir pour la sécurité des voyageurs, une rupture, ou toute autre détérioration d'un rail qui n'aurait pas été découverte à temps, a conduit les compagnies de chemin de fer à s'entourer pour leur fabrication et leur réception des précautions les plus minutieuses. Nous ajoutons à dessin « qui n'aurait pas été découverte à temps », car, quelles que soient les mesures prises, les rails en acier se brisent, dans certains cas, comme le faisaient du reste les rails en fer, et c'est à réduire autant que possible ces avaries, et surtout à en paralyser les conséquences, que les compagnies de chemins de fer apportent avec raison tous leurs soins. Les commandes sont donc faites en vertude cahiers de charges qui, depuis que l'emploi de l'acier s'est généralisé, ont été soigneusement revisés. Ces cahiers de charges qui pénètrent moins qu'autrefois dans les détails de la fabrication, sont d'autant plus sévères relativement aux épreuves de réception, qui comprennent principalement des épreuves à la flexion, des épreuves au choc et des essais à la traction de barreaux découpés dans diverses parties du rail. C'est à cette dernière série d'opérations qu'on attache le plus d'importance aujourd'hui, et nous voyons ainsi pénétrer dans la pratique l'emploi des données scientifiques qui nous ont longtemps arrêtés en commençant.

Les *essais à la flexion* consistent à exercer, au moyen d'une presse hydraulique, une forte pression sur un fragment de rail assez long et posé sur deux appuis de

distance invariable. La pression s'exerce naturellement au point milieu entre les deux appuis, dont l'écartement varie presque toujours entre 1^m,00 et 1^m,10. L'expérience est double en ce sens que le rail doit pouvoir supporter une première charge sans flèche sensible, et une seconde sans rupture. Les limites entre lesquelles varient ces pressions, dépendent naturellement du profil adopté et du poids de ce profil. Pour le rail Vignole de la société autrichienne-hongroise des chemins de fer de l'État, haut de 0^m,125, ayant une largeur de bourrelet de 0^m,059, de patin de 0^m,105, et d'âme de 0^m,014, ce qui correspond à un poids par mètre courant de 55 kilogrammes, la pression à supporter sans flèche permanente est fixée à 15 000 kilogrammes et la pression sans rupture à 27 000, l'écartement des appuis étant de 1^m,10. Si nous prenons comme point de comparaison le rail Vignole français du type P.-L.-M. (A), pesant exactement le même poids et ayant, comme dimensions correspondantes, 0^m,127, 0^m,060, 0^m,995, 0^m,0115, qui diffèrent bien peu des précédentes, nous voyons les pressions portées à 23 000, respectivement 55 000 kilogrammes, ce qui montre, comme nous avons déjà eu l'occasion de le voir par la teneur en carbone, qu'on emploie en France pour la fabrication des rails un acier plus dur qu'en Autriche-Hongrie.

Les épreuves au choc se font au moyen d'un mouton tombant d'une hauteur variable sur un fragment de rail soutenu par deux appuis dont l'écartement est ordinairement le même que pour les épreuves à la flexion. Le poids du mouton varie de 300 à 1000 kilogrammes, et la hauteur de laquelle ce mouton doit tomber sans causer la rupture du rail a pour limite inférieure 1^m,50, et atteint 10 mètres dans certaines compagnies. Nous citerons comme conditions moyennes celle de la société autrichienne-hongroise des chemins de fer de l'État qui, pour le rail de 55 kilogrammes déjà décrit, demande pour un mouton de 500 kilogrammes et un écartement des appuis de 1^m,10, une hauteur de chute de 2^m,50, si la température est inférieure à 0°, de 3^m,50 de 0° à 20°, et de 4^m,50 au-dessus de ce dernier chiffre. Cette société fait, comme on voit, une large part aux circonstances thermométriques qui accompagnent les essais, et ce soin, qui concorde bien avec les indications théoriques, mérite d'être signalé.

La plupart des compagnies demandent, outre ces essais qui rentrent plutôt dans le domaine de la pratique, des expériences de traction sur des éprouvettes de dimensions données. L'Union des chemins de fer allemands, qui permet d'appliquer une certaine unité de vues techniques à un réseau de près de 60 000 kilomètres, demande à cet égard qu'un barreau cylindrique pris dans le champignon du rail, et ayant 0^m,24 de longueur entre les repères et de 0^m,025 de diamètre, donne une résistance minima à la rupture de 50 kilogrammes, avec une striction minima de 50 pour 100. En outre, la somme des deux chiffres ci-dessus doit dépasser le chiffre de 85, qui représente le coefficient total de qualité de l'acier employé.

Non contentes de s'entourer de ces multiples précautions, les compagnies de chemins de fer demandent généralement aux usines une *garantie* de durée des rails fournis, en ce sens que tout rail détérioré avant un certain nombre d'années doit être remplacé par le fournisseur sans aucune indemnité. La durée de ces garanties varie suivant des circonstances commerciales dans lesquelles nous n'avons pas à entrer ici. Nous connaissons des usines allemandes qui ont accepté autrefois l'énorme garantie de douze années. Ces garanties varient actuellement de trois à cinq ans, et

il est certain que lorsque les rails ont supporté sans avaries cette première période de leur emploi, l'usure normale, la seule qui reste à craindre, leur assure une durée telle que la garantie des usines n'a plus à entrer en ligne de compte.

Outre la garantie basée sur le temps écoulé depuis la mise en service, nous avons vu certaines compagnies imposer le passage d'un nombre déterminé de trains sur les voies avant que l'usine fût déchargée de sa responsabilité. Cette manière de faire est évidemment plus exacte, puisque, dans les premières années qui suivent l'ouverture d'un nouveau chemin, le trafic est loin d'avoir acquis tout son développement, mais elle est compliquée, et elle ne s'est que peu répandue.

Durée comparée des rails en fer et des rails en acier. — C'est par l'examen de cette question que nous terminerons ce qui concerne l'emploi de l'acier pour la fabrication des rails.

La durée des rails en fer varie nécessairement beaucoup avec leur qualité. La société autrichienne-hongroise, dont nous utiliserons souvent dans cette partie de notre travail les intéressantes statistiques, a eu dans ses voies des rails faits avec des fers fins de Styrie, et qui, après dix ans, n'avaient donné que 5,26 pour 100 de relevages, tandis que, dans les mêmes conditions, des rails en fer à gros grain provenant d'usines allemandes et belges, en avaient donné jusqu'à 55 pour 100. Pour les rails d'acier, les différences entre les diverses provenances ne sont pas aussi sensibles, ce qui tient aussi à ce que les conditions de réception sont devenues si rigoureuses depuis l'emploi du métal fondu, que les rails faits de ce métal ne sont jamais de médiocre qualité. Quoi qu'il en soit, dans la même période décennale, la proportion des rails d'acier doux retirés des voies de la Société autrichienne-hongroise variait de 0,64 à 1,21 pour 100, et encore, à l'époque où les fournitures avaient été faites, on poinçonnait les trous de boulons au lieu de les percer, ce qui donnait une cause de détérioration disparue depuis lors. On voit quel énorme progrès la métallurgie moderne a permis de réaliser, puisqu'on livre aujourd'hui à un prix égal et même inférieur à celui des anciens rails en fer, des produits d'une durée au moins vingt fois plus grande.

§ II. — PETIT MATÉRIEL D'ATTACHE.

On désigne sous ce nom les pièces de formes assez variées (éclisses droites et éclisses cornières, boulons, crampons, tire-fonds, plaques de joint, etc.) qui servent à relier les rails entre eux et à les fixer à la traverse. Ces pièces ne sont point exposées à l'usure proprement dite, mais plutôt à des ferraillements, à des efforts de traction et d'arrachement de nature assez complexe. Les aciers doux sont parfaitement aptes à la fabrication des boulons, des crampons et des tire-fonds. Les éclisses et les plaques de joint, qui sont peu éprouvées, continueront longtemps encore à être fabriquées au moyen de vieux rails en fer dont les emplois deviennent de plus en plus limités.

§ III. — TRAVERSES MÉTALLIQUES.

La question de l'emploi de l'acier doux pour les traverses métalliques est une de celles qui préoccupent le plus en ce moment les métallurgistes. Cette étude a fait depuis quelques années de très grands progrès dans les pays qui nous entourent, tandis qu'en France quelques essais malheureux, réalisés dans des conditions insuffisantes, comme qualité de métal et comme emploi de matière, l'ont en quelque sorte enrayée dès son origine. Ce n'est pas ici le lieu d'examiner les divers profils de traverses métalliques, qui sont fort nombreux, ni les différents moyens employés pour l'attache du rail à la traverse, qui constitue un des points délicats de la question. Nous nous bornerons à reproduire quelques considérations générales extraites d'un intéressant mémoire de M. Bricka, ingénieur en chef de la voie et des bâtiments des chemins de fer de l'État, fait à la suite d'une étude très complète des voies entièrement métalliques à l'étranger.

« L'emploi du procédé Thomas et Gilchrist, dit M. Bricka, grâce auquel on peut produire le métal fondu à un prix presque aussi bas que le fer puddlé, permet aujourd'hui de renoncer complètement au fer laminé et d'en éviter les inconvénients. On sait que la déphosphoration fournit un acier extrêmement doux, l'élimination du phosphore n'ayant lieu qu'après celle du carbone. Celui qu'on emploie pour les traverses est en réalité du fer très homogène plutôt que de l'acier. Les cahiers de charges stipulent généralement que sa résistance à la traction ne sera pas inférieure à 45 kilogrammes minimum, avec 15 pour 100 d'allongement minimum, ou mieux 35 pour 100 de striction minima. On peut d'ailleurs l'obtenir par la méthode acide (procédé Bessemer ou Martin ordinaire) avec de bons minéraux, comme on l'obtient par la méthode basique avec les minéraux phosphoreux.

« La malléabilité et la ductilité de l'acier doux sont extrêmes; on peut en donner une idée par la clause suivante, qui est ordinairement inscrite dans les cahiers de charges pour fournitures de traverses :

« On aplatira à froid, et sous un pilon à vapeur, une traverse quelconque que l'on repliera ensuite sur elle-même par son milieu, de façon à ce que le diamètre du cercle à la partie repliée ne soit pas au-dessus de 75 millimètres. Pendant toute cette opération, le métal ne doit présenter aucune cassure, fendillement ou exfoliation; il doit au contraire rester complètement intact. »

« Cette ductilité remarquable explique la facilité avec laquelle s'exécutent certaines opérations, aujourd'hui courantes en Allemagne, pour les traverses, et qui consistent à plier ou à emboutir à froid le métal. Indépendamment des facilités qu'elles donnent pour le travail du métal, les qualités de l'acier doux le rendent parfaitement propre à la fabrication des longrines ou des traverses. Il résiste bien à l'écrasement, supporte parfaitement les chocs, et, dans le cas même où les efforts qu'il a à supporter dépassent la limite d'élasticité, il se plie sans se briser. Il est enfin, en raison même de son homogénéité, encore moins attaquable par la rouille, que le fer puddlé lorsqu'il est dans les voies. »

Nous avons tenu à reproduire textuellement cette appréciation de M. Bricka,

parce qu'elle témoigne de la confiance que les ingénieurs ont aujourd'hui dans l'emploi des aciers doux, et confirme nos appréciations sur l'avenir de ce métal. L'utilisation des traverses métalliques aurait certainement pris déjà en France un grand développement si les perfectionnements réalisés dans la préparation des traverses en bois n'avaient aussi beaucoup prolongé leur durée. La question technique, si l'on s'en rapporte à ce qui a été fait à l'étranger, peut être considérée comme résolue ; la question économique attend encore sa solution¹.

§ IV. — MATÉRIEL FIXE DE LA VOIE.

On désigne ordinairement sous ce nom les nombreux appareils, tels que ponts tournants, plaques tournantes, changements de voies, signaux divers, construits soit en fonte moulée, soit en fer laminé sous diverses formes. Dans tous ces emplois, le fer fondu tend à se substituer au fer soudé ; la question de prix joue ici un rôle prépondérant. Pour les croisements de voie en particulier, faits autrefois au moyen de rails ajustés, l'emploi de l'acier coulé devient de plus fréquent. Nous reviendrons sur ce point dans le paragraphe consacré à la fabrication des moussages en acier.

§ V. — BANDAGES.

Les bandages de locomotives et de wagons sont pour le matériel roulant ce que sont les rails pour le matériel de la voie. En contact permanent avec ces derniers, leur bonne qualité importe au moins autant à la sécurité du voyageur que celle des rails eux-mêmes ; ils représentent d'ailleurs un tonnage assez important pour qu'un grand nombre d'usines aient fait tous les sacrifices nécessaires en vue d'améliorer sans cesse leur fabrication.

Le lingot employé comme point de départ du bandage sans soudure en acier fondu, présente généralement la forme d'un tronc de cône avec génératrice faiblement inclinée.

Les dimensions de semblables lingots pour bandages de wagon de dimensions ordinaires étaient dans les dernières années à l'usine de Reschitzka, que nous prenons comme exemple pour étudier cette fabrication, de 0,55 à 0,40 à la base, de 0,28 à 0,55 au sommet, la hauteur variant de 0^m,50 à 0^m,60 (fig. 51). Voici la série des opérations auxquelles ces lingots étaient soumis :

Après une première chaude, le lingot était porté sous un marteau-pilon à simple effet, de 17 tonnes, et forgé dans tous les sens de manière à en former une galette de 0^m,20 d'épaisseur, de 0^m,60 de diamètre à la partie inférieure et 0^m,50 pour la face d'en haut. On introduisait alors dans le centre de la galette, du moyen de vio-

¹. Depuis le moment où ces lignes étaient écrites l'administration des chemins de fer de l'État a commandé 25 000 traverses métalliques dont la fourniture est faite par la Société des hauts fourneaux, forges et aciéries de Denain et d'Anzin.

lents coups de pilon, une série de mandrins de diamètre de plus en plus fort, de manière à enlever un bouchon central, laissant un vide intérieur d'environ 0^m.25 de diamètre. Après ce débouchage, la galette, transformée en une sorte de bague, était encore une fois travaillée sous le marteau, frappant à toute volée, pour être ramenée à l'épaisseur de 0^m.20 et être bien dressée sur ses deux faces. La figure 52 donne l'indication de la forme de la pièce après cette première élaboration.

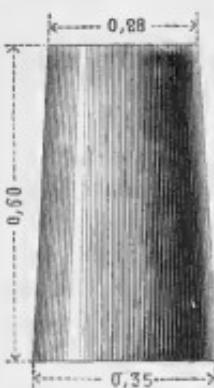


Fig. 51.

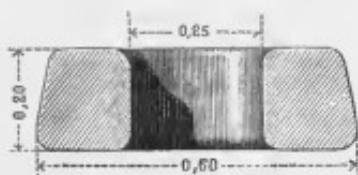


Fig. 52.

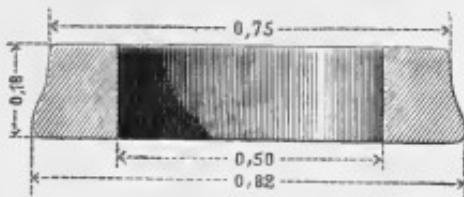


Fig. 53.

L'opération suivante consistait en un *bigornage* pratiqué au moyen d'une enclume et d'une frappe de forme spéciale, telle qu'elle est représentée sur la figure 54. Cette opération a pour but de faciliter la formation du boudin et d'augmenter le diamètre intérieur du bandage, qui arrivera à ses dimensions définitives par le travail du laminoir. La figure 55 montre l'aspect du bandage bigorné.

Les laminoirs à bandages rentrent dans deux types essentiellement différents : ceux où le bandage est laminé horizontalement et où par suite l'axe des cylindres lamineurs est vertical, et ceux où le bandage étant vertical, ce sont forcément les cylindres qui ont la position inverse. Les appareils employés en Allemagne et en Autriche sont presque tous de la première catégorie, tandis qu'en France ceux de la seconde sont assez fréquents.

Dans les deux cas les laminoirs à bandages sont ordinairement caractérisés par



Fig. 34.

ce fait que le bandage, au lieu de passer par une série de cannelures de forme décroissante, reste dans la même cannelure ; celle-ci se modifie pendant le laminage même par suite du rapprochement d'un galet qui, s'appuyant sur la face intérieure et non profilée du bandage, vient compléter le profil. Ce rapprochement étant ordinairement opéré au moyen de la pression hydraulique, détermine une compression énergique et produit un étirage de la bague dont le diamètre augmente ainsi au détriment de son épaisseur, jusqu'au moment où le diamètre et le profil voulus ont

été réalisés en même temps. Cette coïncidence est le point délicat de la fabrication, car on n'a pas ici comme pour les rails la ressource d'arriver au poids exact en enlevant les deux bouts. Il faut, dans le laminage du bandage sans soudure, que le poids du lingot soit calculé très exactement, et que la série des manipulations subséquentes n'entraîne que juste le déchet nécessaire pour arriver au produit fini dans les conditions de tolérance réglementaire.

Pour ces raisons, le rendement d'un atelier de fabrication de bandages, quelque bien installé qu'il soit, est toujours bien inférieur à celui d'un lamoir à rails. Le travail de martelage que nous avons décrit ci-dessus ne permet pas d'arriver facilement au dégrossissage et au bigornage de plus de 200 lingots par 24 heures, et c'est aussi la capacité de travail du lamoir lui-même. On peut évidemment simplifier le travail en partant de lingots ayant une forme se rapprochant de celle du bandage fini. Nous avons vu quelquefois couler à l'atelier Bessemer des lingots ayant déjà la forme de bagues, avec lesquelles on pouvait, avec un minimum d'élaboration, passer du produit brut au produit terminé. Il y a lieu de se demander si des bandages fabriqués dans de semblables conditions présentent, au point de vue de la qualité, des garanties égales à celles que donne un martelage plus intense et plus prolongé.

Les dimensions des bandages varient entre de larges limites. Le diamètre intérieur, qui peut être réduit à 40 ou 50 centimètres pour de petits wagonnets, s'élève jusqu'à 2 mètres pour les roues motrices des locomotives remorquant les trains de grande vitesse. Le profil diffère aussi suivant le véhicule pour lequel le bandage est employé. Les bandages ordinaires de wagons de la société autrichienne-hongroise des chemins de l'État ont une largeur de 0^m,150 et une épaisseur moyenne de 0^m,055. La surface de roulement présente sur le boudin une inclinaison de $\frac{1}{16}$.

Ces dimensions sont celles qui sont adoptées par la plupart des compagnies de chemins de fer, et pour arriver exactement au profil demandé par chacune d'elles et obtenir surtout une identité parfaite entre les deux bandages d'un essieu monté, ces bandages sont mis sur le tour après leur embatage sur les deux roues et leur calage sur l'essieu lui-même.

Si le métal fondu est aujourd'hui absolument adopté pour les rails, il n'en est pas de même pour les bandages ; en Allemagne et en Autriche les bandages en acier sont à peu près universellement employés ; toutefois dans ces deux pays on prend encore de préférence pour les locomotives des bandages en acier fondu au creuset, tandis que pour les wagons l'acier Martin jouit par rapport au Bessemer d'une certaine préférence. En France, où quelques ruptures de bandages sous des voitures en service ont eu de fatales conséquences, on hésite à renoncer au fer pour les trains de voyageurs ou, dans tous les cas, on recherche des aciers doux, dans lesquels les cassures sont toujours moins à craindre, mais qui sont forcément soumis à une usure plus rapide qu'un acier plus carburé, comme celui employé en Autriche, où l'on choisit de préférence pour les bandages le numéro 5 de l'échelle de Tunner, répondant, comme on s'en souvient, à une teneur en carbone d'environ 0,50 %.

Les conditions de réception des bandages sont analogues à celles des rails. On soumet le bandage placé de champ au choc d'un mouton d'un poids variable

suivant le diamètre du bandage qui doit en supporter le coup sans rupture. La flèche prise par le bandage, c'est-à-dire la différence entre son diamètre primitif, et le petit axe de l'ellipse qui résulte du premier choc ou des chocs successifs, est un bon élément de comparaison de la dureté plus ou moins grande du métal.

Un bandage en acier numéro 5 de la compagnie des chemins de fer galiciens, présentant un diamètre intérieur de 0^m,89, une épaisseur de 0^m,060 et une largeur de 0^m,154 a pris à Reschitzza, sous les chocs successifs d'un mouton de 500 kilogrammes tombant de 5 mètres, une flèche de 0^m,012 après le premier coup, de 0^m,052 après le cinquième, de 0^m,091 après le dixième, et de 0^m,125 après le quatorzième. Les mêmes expériences faites sur des bandages d'autres compagnies ont donné des résultats à peu près semblables.

Comme pour les rails, les administrations de chemins de fer demandent pour les bandages des essais à la traction, faits sur des éprouvettes de dimensions déterminées. L'Union des chemins de fer allemands exige pour les bandages de locomotives une résistance minima de 60 kilogrammes avec une striction de 55 %, et pour les bandages de wagons une résistance de 45 kilogrammes avec une striction de 55 % sans que, dans les deux cas, la somme des deux chiffres puisse être inférieure à 90. On demande donc aux bandages de locomotives une dureté plus grande qu'aux bandages de voitures et de wagons, et c'est pour cela que la plupart des compagnies faisait partie de l'Union imposent l'emploi de l'acier au creuset pour leur fabrication.

Nous terminerons ce qui concerne les bandages par quelques indications statistiques sur leur durée moyenne, ainsi que nous l'avons fait pour les rails. Sur les 52 500 bandages en acier que la société autrichienne-hongroise avait en service en 1882, on a dû en mettre dans la même année 279 hors de service, ce qui représente 5,5 %. On avait constaté des fissures en long sur 54 bandages, des fissures en travers sur 172, des écrasements sur 54 d'entre eux. Il est vrai que sur le nombre total indiqué ci-dessus, plus de 15 000 provenaient de livraisons antérieures à l'année 1872, c'est-à-dire d'une époque où le bandage laminé en barre puis cintré et soudé, c'est-à-dire présentant toujours un point vulnérable, n'avait pas encore fait place au bandage sans soudure, le seul qui soit employé aujourd'hui.

§ VI. — ESSIEUX.

Pour les essieux comme pour les bandages les avis diffèrent encore sur la préférence à donner au fer fondu ou au fer soudé. On reproche au premier de ne pas posséder, étant un produit de cristallisation, cette structure fibreuse, qu'on rencontre dans le fer nerveux, et qui pour les essieux paraît présenter des conditions de sécurité toutes spéciales. Les résultats que donnent les bons aciers dans les épreuves à la traction et à la flexion sont bien faits à vrai dire pour dissiper ces préventions, et il est certain que d'ici quelques années l'emploi du métal homogène aura fait en France dans cette voie les progrès qui se sont manifestés en Allemagne.

La comparaison des règles tracées dans les deux pays pour la fabrication des

essieux de chemins de fer, nous conduit d'ailleurs à une constatation qui n'est pas sans intérêt. Les chemins allemands et autrichiens demandent le plus souvent un acier doux compris entre les numéros 6 et 7 de l'échelle de Tunner, et intermédiaire entre la qualité pour rails et la qualité pour tôle, qui exige la plus grande douceur comme nous le verrons plus loin. Les usines françaises, dans leur classification, indiquent au contraire les essieux comme devant être fournis, ainsi que les rails et les bandages, en métal demi-dur, ne donnant que 18 à 20 % d'allongement. Il est clair qu'un pareil métal présente moins de garanties contre les ruptures qu'un acier très doux donnant par exemple un allongement de 24 à 26 %. Ce même acier ayant néanmoins une résistance de 45 à 50 kilog. présente encore, par rapport au meilleur fer, une supériorité assez grande pour permettre de réduire sensiblement la section de l'essieu et de réaliser, si on le désire, une économie dans les frais de construction du véhicule.

Les essieux ne présentent pas comme les rails et les bandages un profil uniforme. La section est toujours circulaire, mais le diamètre de cette section varie suivant les divers points où elle est opérée. C'est ainsi que pour un essieu de wagon long de 2^m, 18, le diamètre au milieu de l'essieu sera par exemple de 0^m, 715, celui des portées de calages, c'est-à-dire de la partie qui porte les roues, de 0^m, 128, et celui des fusées, c'est-à-dire des deux extrémités qui viennent se placer dans les coussinets des boîtes à graisse, est de 0^m, 095. L'essieu brut ne peut donc être dans aucun cas un produit de laminage. On peut prendre comme point de départ de la fabrication de gros ronds laminés, mais la forme définitive est toujours donnée sous le marteau-pilon, dans des matrices appropriées.

Les essieux sont soumis pour leur réception à des épreuves au choc qui consistent à les placer sur deux appuis et à faire tomber un mouton en leur milieu. Les coups de ce mouton sont renouvelés jusqu'au moment où une flèche déterminée à l'avance a été atteinte, et l'essieu retourné, c'est-à-dire soumis à des chocs en sens inverse, doit reprendre son horizontalité sans se rompre ni présenter le moindre défaut. Les relevés que nous avons faits pour un certain nombre de compagnies de chemins de fer montrent que l'écartement des appuis peut varier de 1^m, 50 à 1^m, 50, le poids du mouton de 300 à 400 et même 500 kilogrammes, enfin la flèche prescrite de 150 à 200 millimètres. Des essais faits à Reschitzka en vue de l'exposition de 1878, ont fait voir que des essieux faits en acier Martin doux, obtenus au moyen d'additions de ferro-manganèse, pouvaient subir un grand nombre de fois ces déformations en sens inverse sans que la rupture se produisit, ni même qu'aucune fissure vint altérer leur surface.

Le passage de la fusée à la portée de calage étant dans l'essieu le point particulièrement fatigué, on exige fréquemment pour la fusée une épreuve spéciale qui consiste à la placer en porte à faux et à la soumettre, par exemple, à une flexion de 85 millimètres, sous le choc d'un mouton de 500 kilogrammes tombant d'une hauteur de 2 mètres, sans qu'elle présente la moindre détérioration au point où la flexion a été opérée.

§ VII. — RESSORTS.

Nous ne saurions entrer ici dans l'examen détaillé des nombreuses pièces qui constituent un wagon et surtout une locomotive. Les boîtes à graisse, plaques de garde, tampons, boîtes à tampons, chaînes et tendeurs d'attelage, longerons, etc., entrent dans la composition de tous les véhicules, et la tendance actuelle est de substituer dans leur fabrication, pour les pièces moulées, l'acier fondu à la fonte ordinaire, pour les pièces laminées, le fer fondu au fer soudé. Parmi ces dernières les ressorts doivent nous arrêter un instant comme pièces devant être fabriquées en acier véritable, c'est-à-dire en acier dur pouvant prendre la trempe, et posséder une forte limite d'élasticité, dont on se préoccupe moins pour les appareils que nous venons d'énumérer.

Le métal qui paraît le mieux convenir pour cet emploi est le n° 2 de la classification reproduite à la page 66, c'est-à-dire un acier donnant, avec une teneur de 0,50 à 0,65 de carbone, une résistance à la rupture de 75 à 80 kilogrammes avec un allongement de 9 à 12 %. En Autriche-Hongrie on emploie le n° 4 de l'échelle de Tunner, contenant 0,75 de carbone, tandis qu'en Suède on se sert de préférence d'acières moins carburés à 0,60 ou 0,70, qui sont trempés à l'eau ou à l'huile, suivant les cas.

§ VIII. — MOULAGES D'ACIER.

Bien que la marine, la guerre et les diverses industries fassent également usage de moules en acier, nous en placons ici l'étude, eu égard à l'avenir que présentent ces produits pour la construction du matériel des chemins de fer.

La difficulté qu'on éprouve à obtenir par le travail au marteau certaines pièces de formes compliquées, pouvant présenter en même temps une grande résistance aux chocs, devait conduire à l'idée de les produire à l'aide d'un moulage, mais en substituant l'acier à la fonte trop fragile en pareil cas. Deux obstacles se presentaient : le premier, résultant de ces souffrances et de ces cristallisations anormales, sur lesquelles nous nous sommes longuement étendus ; le second, de la difficulté de trouver un récipient de composition appropriée. La fonte se refroidissant rapidement avait l'inconvénient de tremper le métal et d'augmenter sa fragilité, tandis que les moules en sable ou en terre jouaient bien le rôle de mauvais conducteurs de la chaleur, mais s'échauffaient eux-mêmes au point de se vitrifier et de rendre la surface des pièces moulées rugueuse et couverte de nombreuses piqûres.

C'est en Westphalie que les progrès décisifs ont été accomplis. Dès 1855, l'usine de Bochum exposait à Londres des cloches en acier fondu, qui permettaient d'enlever pour certains articles la substitution de l'acier au bronze ; en 1862, à Londres, et en 1867, à Paris, cette même usine présentait en même temps que celle de Krupp des roues pleines en acier, en piles venues d'un seul jet de coulée, et

remarquables par leur homogénéité aussi bien que par la netteté de leur surface.

Tous ces produits étaient obtenus par la fusion au creuset, avec des dosages plus ou moins variés, où les additions de spiegel, matière première abondante, comme on sait, sur les bords du Rhin, jouaient le premier rôle. L'idée devait donc se présenter de substituer un métal analogue, fourni facilement par la cornue Bessemer, au produit si coûteux du creuset, et on obtint bientôt, dans plusieurs des ateliers Bessemer nouvellement construits, de très beaux moulages parfaitement sains, équivalents en un mot à ceux que nous venons de citer. Ce ne fut toutefois qu'un an ou deux après l'Exposition de 1867, quand on devint maître de la fusion de l'acier sur sole, que la fabrication des moulages en acier commença à être vraiment importante. Les sections suédoise, autrichienne, anglaise et française réunissaient à l'Exposition de 1878 de nombreux spécimens de moulages en acier parfaitement nets de forme et sains de corps, parmi lesquels ceux présentés par l'usine de Terre-Noire occupaient la première place.

La méthode grâce à laquelle cet établissement avait obtenu ces beaux résultats est basée sur ce fait, observé dans l'opération Bessemer, qu'un bain métallique contenant du carbone et du silicium perdra par une action affinante quelconque son silicium avant son carbone ; en d'autres termes, le silicium, introduit dans un bain métallique, prévient la formation de l'oxyde de carbone. Si donc on obtient au four Martin un bain affiné laissant échapper des bulles d'oxyde de carbone, ces bulles devront cesser de se former lorsqu'on introduira dans le bain un alliage de silicium remplaçant le spiegeleisen ou le ferro-manganèse, et la formation de gaz oxyde de carbone sera ainsi évitée. Or, comme c'est ce dernier qui donne lieu aux soufflures, le métal pourra être coulé avec une homogénéité parfaite et acquérir les propriétés que les élaborations mécaniques permettent seules ordinairement d'obtenir.

Les additions finales constituent donc la partie essentielle de la fabrication des moulages sans soufflures. Elles consistent :

1^o En fontes durcissantes, riches en carbone, blanches et manganésées, grises et un peu siliceuses, ou même dans quelques cas en spiegel pauvre, contenant 4, 5, 6 % de carbone combiné ;

2^o En spiegel riche et en ferro-manganèse contenant 5 à 6 % de carbone, 50, 40, 60 et même jusqu'à 80 % de manganèse ;

3^o En fontes siliceuses spéciales auxquelles on a donné le nom de *ferro-silicium* et pouvant contenir jusqu'à 20 % de ce métalloïde.

Suivant la forme de l'objet, la dureté et la résistance qu'on veut obtenir, on combinerà ces diverses additions ; la pratique indiquera bien vite quels sont pour une fonte initiale donnée les mélanges les plus avantageux.

La fabrication des moulages en acier s'est complétée de bonne heure par des recuits, dont nous avons déjà eu l'occasion de reconnaître les effets dans la partie théorique de cet ouvrage. Dès 1863, en Angleterre, un métallurgiste éminent, sir J. Whitworth, fabriquait des objets moulés en acier fondu (canons, projectiles, etc.), en remplaçant toutes les opérations de forgeage par une trempe à l'eau, à l'huile ou dans tout autre liquide approprié, avec ou sans recuit. Malheureusement, la trempe, même la trempe douce à l'huile, et le recuit, très efficaces comme moyen d'amélioration des qualités physiques et mécaniques du métal, sont souvent fort

difficiles à appliquer à des objets volumineux de formes variées et dyssymétriques, parce qu'il est impossible de chauffer et de refroidir uniformément de pareils objets. C'est certainement à ces difficultés qu'il faut attribuer l'abandon que sir J. Whitworth a fait de ce premier procédé, et la préférence qu'il a décidément donnée depuis à celui de la compression du métal à l'état liquide en lingots, de forme simple avec forgeage ultérieur. L'emploi des alliages siliceux a, comme nous l'avons vu, permis de faire un pas de plus en évitant le forgeage, tout en arrivant à des résistances satisfaisantes, sans atteindre pourtant d'une manière régulière celles des produits forgés ou laminés.

De tous les moulings en acier, les croisements de voie sont ceux qui occupent dans le matériel des chemins de fer la place la plus importante. Ils ont permis d'obtenir d'une seule pièce et dans des conditions de stabilité particulièrement satisfaisantes, l'appareil formé autrefois de rails spéciaux rabotés et assemblés. Un autre moulage, qui s'est beaucoup répandu en Allemagne, consiste en une roue pleine de wagon, dans laquelle le moyeu, les rayons, qui sont remplacés ici par une flasque ininterrompue, et le bandage sont coulés d'une seule pièce. On comprend qu'en pareil cas les ruptures soient beaucoup moins à craindre, puisque le bandage, au lieu d'être fixé au faux cercle par un certain nombre de boulons, fait corps avec la roue entière et ne peut par suite brusquement s'en séparer.

Les moulings en acier commencent à s'introduire dans la construction des locomotives sous forme de boîtes à graisse de poulies d'excentrique, et de quelques autres pièces de forme compliquée ; nul doute que leur emploi ne se développe lorsqu'e l'expérience aura montré que les avantages que présente leur facile exécution sont compatibles avec la solidité et la durée en service.

CHAPITRE XIX

EMPLOI DE L'ACIER PAR LES ADMINISTRATIONS DE LA MARINE ET DE LA GUERRE

Tôles, Cornières, Barres profilées. — Blindages. — Pièces mécaniques. — Canons, affûts et projectiles.

Les aciers employés pour la marine consistent principalement :

- 1^o En tôles, cornières et aciers profilés divers pour la construction des coques et des intérieurs de navires ;
- 2^o En tôles pour chaudières ;
- 3^o En blindages de diverses dimensions ;
- 4^o En pièces de machines de formes variées.

Nous allons examiner, pour chacun de ces trois groupes de produits, les progrès faits dans leur emploi, les qualités qu'on leur demande, et l'avenir qui leur paraît réservé.

L'emploi de l'acier dans les constructions navales a été appliqué en Angleterre, dès 1859, pour la coque des navires de dimensions moyennes. En 1860 et 1861, cinq paquebots-poste faisant le service du Pas de Calais furent mis à l'eau dans ces conditions. En 1865, l'Amirauté adoptait l'acier pour la construction du navire de guerre *le Bellérophon*, et depuis cette époque le nombre des navires en acier a été tellement en augmentant que, en janvier 1884, il y avait sur les chantiers d'Angleterre 116 grands steamers dont la coque était tout entière en métal fondu.

En France, si l'emploi de l'acier a été un peu plus tardif, la marche en a été d'autant plus sûre, et le succès obtenu plus complet. C'est ainsi qu'en mai 1873, M. Barnaby, directeur des constructions navales de la marine royale anglaise et vice-président de l'*Institut of naval Architects*, reconnaissait, dans une communication faite à cette société, que les aciers travaillés dans les chantiers de la marine française à Lorient et à Brest étaient d'excellente qualité, et que leur emploi s'y développait avec une confiance plus grande que celle que l'on avait alors pour ce métal en Angleterre. En fait, dans le grand cuirassé *le Redoutable*, en construction à Lorient en 1874, l'acier était admis pour le bordé intérieur, les membrures, le cuirassement du pont, les cloisons, les plaques d'appui et la cuirasse, et peu de temps après deux autres cuirassés *le Tonnerre* et *la Tempête*, étaient mis en construction à Brest et à Lorient dans les mêmes conditions, à la suite d'études très

complètes faites par M. de Bussy, directeur des constructions navales et par ses adjoints, MM. les ingénieurs Barba et Godron.

L'emploi des cornières et des barres profilées devait marcher parallèlement avec celui des tôles, et les conditions de réception de ces matières ont été précisées pour la première fois dans la circulaire ministérielle du 11 mai 1876, dont nous croyons utile de résumer les prescriptions, bien qu'elles aient été modifiées depuis.

En ce qui concerne d'abord les tôles, la marine prescrit trois sortes d'épreuves : des épreuves à froid, des épreuves à chaud et des essais de trempe.

Les épreuves à froid ont pour but de déterminer la résistance à la rupture, et l'allongement du métal, dans le sens du laminage et dans le sens perpendiculaire. La barrette d'épreuve (non recuite) a une section rectangulaire de 30 millimètres de largeur sur une épaisseur égale à l'épaisseur de la tôle ; la longueur de la partie prismatique est toujours exactement de 200 millimètres.

Dans ces conditions, les tôles de coque de 6 à 20 millimètres d'épaisseur devaient donner dans le sens de la moindre résistance 45 kilog. à la rupture avec 20 %, d'allongement ; les bandes et couvre-joints, de 6 à 16 millimètres, devaient donner dans le sens de la longueur 48 kilog. et 22 %, dans le sens du travers 44 kilog. et 18 %. Pour les tôles plus minces la résistance minima augmente et l'allongement diminue ; quant aux tôles plus épaisses, au-dessus de 20 millimètres, la charge n'est plus que 44 kilogrammes, mais l'allongement de 20 % reste le même.

Les essais à chaud consistent à exécuter avec un morceau de tôle une calotte hémisphérique à bord plat conservé dans le plan primitif de la tôle. Le diamètre de la demi-sphère, mesuré intérieurement, est égal à 40 fois l'épaisseur de la tôle, et le bord plat supérieur a pour largeur 10 fois cette épaisseur.

En outre, pour les tôles de plus de 5 millimètres d'épaisseur, il est confectionné une cuve à base carrée, à bords relevés à équerre, la base de la cuve ayant 50 fois l'épaisseur de la tôle et les bords 10 fois cette épaisseur. Les pièces ainsi exécutées avec toutes les précautions qu'exige le travail de l'acier ne devraient présenter ni gerçure ni fente.

Les essais de trempe sont faits avec des barreaux de 26 centimètres de longueur et 4 centimètres de largeur pris tant en long qu'en travers. Chauffés uniformément au rouge cerise un peu sombre, puis trempés dans de l'eau à 28°, ils doivent pouvoir prendre sous l'action de la presse, sans présenter des traces de rupture, une courbure permanente dont le rayon minimum mesuré intérieurement ne doit pas être supérieur à l'épaisseur du barreau.

Les barres profilées donnent lieu également à trois séries d'épreuves. Les épreuves à froid se font sur des barrettes de mêmes dimensions que les tôles, mais prises seulement dans le sens du laminage. La résistance doit être pour les cornières et les barres à simple T de 48 kilog. avec 22 % d'allongement ; pour les barres à double T de 46 kilog. avec 18 %. L'essai à chaud consiste pour les cornières à en prendre un bout et à faire un manchon tel qu'une des branches de la cornière restant dans son plan, l'autre branche forme un cylindre d'un diamètre intérieur égal à 3 fois 1/2 la largeur de la branche. Un autre bout coupé dans une autre barre est ouvert jusqu'à ce que les deux faces intérieures soient sensiblement dans le même plan. Enfin un troisième bout est fermé jusqu'à ce que les deux branches arrivent au contact,

Pour les barres à simple T les épreuves à chaud sont analogues, et quant aux barres à double T, l'épreuve à laquelle elles sont soumises consiste à fendre la lame centrale, à percer un trou à l'extrémité de la fente, et à ployer une des branches de manière à l'amener sensiblement à 45° de l'autre.

Les essais de trempe sur les profilés sont les mêmes que sur les tôles.

Il résulte de cet ensemble d'épreuves que la circulaire de 1876 demandait pour les tôles un métal doux, mais n'ayant pas encore l'extrême douceur que les numéros inférieurs de l'échelle des usines travaillant en déphosphoration peuvent donner aujourd'hui. On semble viser plutôt cette dernière qualité dans les dépêches ministérielles de décembre 1882 et janvier 1885, qui indiquent pour les tôles devant être employées à la construction d'un certain nombre de navires mis nouvellement en chantier, 40 kilog. seulement de résistance avec 24 % d'allongement en travers, et pour les barres 58 kilog. de résistance avec 26 % d'allongement en long. Ces conditions ne représentent peut-être pas encore les dernières conclusions auxquelles on arrivera, mais, soit qu'on persiste dans la voie de la douceur qui restreint évidemment les avantages de la diminution de poids par rapport aux tôles en fer soudé, soit qu'on revienne aux qualités qui compensent une plus grande résistance par une malléabilité moindre, l'emploi du métal fondu pour la construction des navires est aujourd'hui un point absolument indiscuté.

Tôles de chaudières. — L'Exposition de 1855 montrait pour la première fois une chaudière en tôle d'acier fondu présentée par MM. Jackson frères, Petin Gaudet et Cie. A la suite de cette expérience, les constructeurs furent autorisés à employer l'acier dans les chaudières, en réduisant d'un tiers les épaisseurs fixées par l'ordonnance de 1845, et en 1861 on réduisit même les épaisseurs de moitié, mais à condition que la tôle présentât au moins 60 kilog. de résistance avec 6,6 % d'allongement. Ce fut d'après ces règles que furent livrées, de 1861 à 1866, les chaudières de trois frégates cuirassées, et que les Compagnies d'Orléans et du Midi mirent en service un certain nombre de locomotives dont les appareils de vaporisation étaient faits avec le nouveau métal.

Les premiers essais ne furent pas heureux. Dans les chaudières marines, les foyers donnèrent lieu à des coups de fen, à des usures très inégales, et à des difficultés de toute sorte, à la suite desquelles les tôles d'acier furent successivement remplacées par des tôles en fer fin. En même temps des explosions en service se produisirent dans les chaudières en acier des deux Compagnies de chemin de fer qui en avaient fait usage les premières, et ces accidents jetèrent sur l'acier mis en contact avec la vapeur une défaveur dont il souffre encore aujourd'hui.

Il est aisé de se rendre compte des causes qui amenèrent les accidents que nous venons de rapporter. La circulaire ministérielle avait engagé les ingénieurs dans une mauvaise voie, en prescrivant l'emploi d'un métal beaucoup trop dur et incapable de donner un allongement satisfaisant. Nous avons vu qu'en Autriche à peu près à la même époque, Tunner recommandait d'employer pour la fabrication des tôles le numéro 7, c'est-à-dire le plus doux de son échelle. De même l'union des chemins de fer allemands prescrit pour les tôles en général 56 kilog. de résistance avec 25 % d'allongement dans le sens du laminage et 52 kilog. avec 15 % pour les éprouvettes prises dans l'autre sens. En France, du reste, on juge les choses

plus sainement aujourd'hui, et les aciéries Thomas recommandent avec raison pour les tôles de chaudière des métaux donnant de 40 à 45 kilos de résistance avec 24 à 20 % d'allongement. On aura évidemment dans ces conditions des chaudières en acier excellentes, comme celles construites en Allemagne, en Autriche et en Angleterre. L'expérience ne tardera pas à faire disparaître chez nous les préventions résultant des erreurs commises lors des premières tentatives.

Quelle que soit la destination des tôles d'acier, leur mode de fabrication reste le même. On prend comme point de départ des lingots méplats, dont le poids variant avec les dimensions de la feuille de tôle à laminer doit toujours être assez grand pour couvrir les déchets et les rognures. Ces lingots réchauffés dans des fours à soles spacieuses sont le plus souvent portés directement aux lamoins, qui consistent en deux cylindres à table unie qu'on rapproche après chaque passage, de manière à obtenir une épaisseur de plus en plus faible du bloc à laminer. En regard aux grandes dimensions qu'on demande aujourd'hui aux feuilles de tôle, qui ont souvent 2 mètres de largeur et de 12 à 15 mètres de longueur, on emploie ici comme pour les rails des appareils réversibles actionnés par des maehtes qui étaient, il y a peu de temps encore, de quelques centaines et sont aujourd'hui de plusieurs milliers de chevaux.

Les feuilles de tôle en sortant du lamoins présentent ordinairement des bords inégaux et ondulés. On les amène à la forme d'un rectangle parfait au moyen de fortes cisailles.

Lorsque la largeur des feuilles ne doit pas être trop considérable, et qu'elles rentrent dans la catégorie désignée communément sous le nom de larges plats, on évite ce cisaillage (qui, ainsi qu'on l'a vu dans la première partie, est toujours accompagné d'une certaine altération des bords de la feuille), en faisant usage d'un *laminoir universel*, dans lequel aux deux cylindres horizontaux viennent s'ajouter deux galets verticaux dont l'ensemble forme une cannelure plate entièrement fermée.

Nous ne saurions terminer ce qui concerne les tôles sans indiquer l'emploi de l'acier pour la fabrication des rivets. L'acier extra-doux remplace très avantageusement pour cet usage les fers fins employés jusqu'à présent, surtout lorsque la rivure est faite à la presse hydraulique, et il présente par rapport au fer, même de qualité supérieure, le double avantage d'une résistance plus grande et d'un prix de revient moins élevé.

Blindages. — La substitution de l'acier au fer, ou, si l'on préfère, du fer fondu au fer soudé pour la fabrication des plaques de blindage, a donné lieu depuis un certain nombre d'années à de nombreux essais de la part des industriels français et étrangers. Tous ces essais ont eu surtout pour but de résoudre la question suivante : Vaut-il mieux obtenir des blindages durs, se brisant peut-être sous l'effort du projectile, mais arrêtant ce dernier et l'empêchant par suite de pénétrer jusqu'au cœur du navire et d'y détruire les organes vitaux, ou bien vaut-il mieux rechercher la douceur qui permet au projectile de faire, sans briser la plaque, un trou de forme régulière qui peut être rendu étanche, sans que la valeur défensive du navire soit sensiblement altérée ? Un moyen terme consisterait à obtenir une plaque mixte, le métal dur étant mis en première ligne pour arrêter l'effort du boulet, et le métal doux placé derrière lui pour donner du corps à la cuirasse et empêcher son émission.

ment. Quelle que soit la nature du métal à laquelle on s'arrête, il est clair que la substitution de grosses masses homogènes constitue un progrès par rapport aux énormes paquets formés de mises en nombre incalculable, au centre desquelles la chaleur nécessaire pour une soudure parfaite ne pouvait pénétrer que difficilement et au prix d'un déchet considérable. L'emploi des aciers fondus a exigé, il est vrai, un renforcement de l'outillage que peu d'établissements ont pu affronter. Nous avons eu l'occasion de décrire le marteau-pilon de 80 tonnes du Creusot, tout spécialement érigé pour l'élaboration des blindages en acier. Lorsque ceux-ci sont fabriqués au laminoir comme aux usines de Saint-Jacques à Montluçon, les cylindres construits d'après le principe du laminoir universel deviennent énormes et exigent des machines motrices en conséquence.

Pièces mécaniques. — Les aciers forgés, laminés et coulés jouent dans la construction des machines marines un rôle au moins aussi considérable que dans les locomotives. Le Creusot et les divers établissements français qui s'occupent de constructions navales, emploient l'acier doux pour la fabrication des arbres droits et coudés, qui représentent le plus gros tonnage, mais aussi pour d'autres pièces, telles que bielles, manivelles, chapes, pièces de gouvernail, pistons à vapeur, tiges de piston, etc. Outre sa plus grande résistance qui permet de diminuer le poids des pièces, le métal homogène présente l'avantage de donner un frottement beaucoup plus doux, et d'offrir des chances moindres d'échauffement dans les paliers.

EMPLOIS DES ACIERS PAR L'ARTILLERIE.

Le service de l'artillerie consomme l'acier pour la construction de divers appareils et de diverses pièces qui peuvent se grouper comme il suit :

- 1° Tubes de canons, frettés, pièces de culasses, affûts ;
- 2° Projectiles pleins et creux ;
- 3° Petit matériel, tel que sabres, baïonnettes, canons de fusils, etc.

L'emploi de l'acier pour ces divers objets est loin de dater de la même époque. Tandis que son utilisation pour la confection des armes blanches remonte à des temps déjà reculés, sa substitution dans les bouches à feu de gros calibre, à la fonte d'une part, au bronze de l'autre, peut être considérée comme récente. L'acier, introduit dans l'artillerie allemande par l'usine de Krupp, n'a été adopté par la France qu'à la suite de la guerre de 1870. Certaines puissances, l'Autriche entre autres, sont encore hostiles à son emploi, et, dans ce dernier pays, on a donné la préférence au bronze trempé par les procédés du colonel Uchatius, qui donne aussi des résultats très satisfaisants.

Canons. — La nature toute spéciale des efforts que doit supporter l'acier employé dans la fabrication des canons, les conséquences incalculables qu'aurait eues, lors de la reconstitution de notre matériel d'artillerie, le choix d'un métal insuffisant, expliquent les nombreuses expériences qui ont été faites à cette époque sur les résistances et les allongements à demander. C'est au Creusot et à quelques usines du

bassin de la Loire que revient l'honneur de s'être prêté à des expériences à la suite desquelles la métallurgie française a été reconnue capable de livrer des produits, dont les fondeurs d'acier de la Ruhr étaient considérés jusqu'alors comme possédant le monopole.

On choisit aujourd'hui comme métal à canons des aciers correspondant à une résistance de rupture d'environ 55 kilogrammes par millimètre carré. A l'origine on découpaient les éprouvettes destinées à ces essais parallèlement à l'axe du canon, et l'on commettait ainsi l'erreur d'essayer en long un métal qui pratiquement ne travaille qu'en travers et par choc. Depuis lors les commissions chargées de l'armement ont compris toute l'importance de cette question, et actuellement tous les barreaux d'essai sont pris dans une rondelle perpendiculaire à l'axe du canon, en exigeant les conditions suivantes pour un métal martelé recuit, trempé à l'huile et recuit à nouveau si cela est nécessaire.

	Kilogrammes.
Culasse . . .	52 ± 5
	62 ± 8
Volée . . .	14
	55 ± 7
Volée . . .	65 ± 10
	14

Afin d'arriver au maximum de résistance on revêt ordinairement les canons à grandes portées de frettes annulaires, qu'on fabriquait d'abord au moyen d'enrouages analogues à ceux dont on faisait usage pour la fabrication des bandages en fer dits sans soudure, avant que le mode de fabrication que nous avons décrit pour les bandages en acier fut adopté. L'usine de Terre-Noire s'est efforcée d'obtenir cette pièce difficile par le procédé de moulage sans soufflures, et nous empruntons à une communication faite par M. Pourcel au Congrès de l'Iron and Steel Institute de 1883, des renseignements intéressants sur cette fabrication.

La pièce à obtenir présentait les dimensions suivantes :

Diamètre extérieur.	560 millimètres
Diamètre intérieur.	246 —
Hauteur.	265 —
Épaisseur de métal.	57 —

On découpaient dans un lingot n'ayant été soumis à aucun martelage des rondelles d'essai, et celles-ci donnaient en moyenne 34¹,50 de résistance à la limite d'élasticité, 56¹,92 de résistance à la rupture et 17,40 pour 100 d'allongement, tandis que les chiffres correspondants exigés par les cahiers de charge étaient 30 — 52 et 15. Ces chiffres montrent qu'on peut, sans avoir recours au martelage, donner à un métal, par des opérations de trempe et de recuit bien faites, les propriétés exigées. La question est de savoir lequel de ces deux procédés permet d'arriver comme prix de revient aux résultats les plus avantageux.

Affûts. — L'adoption de nouvelles bouches à feu plus puissantes que les an-

eiennes devait forcer l'artillerie à modifier la construction de ses affûts. Les anciens affûts en bois ne présentaient pas une résistance suffisante pour supporter les percussions produites dans ces canons qui tirent des projectiles lourds et à forte charge; de plus le bois a le défaut de n'être pas durable; aussi, malgré ses précieuses qualités d'élasticité, lui a-t-on préféré la tôle d'acier pouvant donner des affûts très résistants, sans avoir le défaut de voler en éclat par le choc d'un projectile. Le nouvel affût de campagne est formé de deux flasques qui sont réunies par des plaques et des entretoises et dont la partie postérieure forme flèche. L'acier entre également pour une large part dans la construction d'un appareil de pointage comprenant la vis de pointage, l'écrou mobile et le support de pointage, comme dans celle des sabots d'enrayage placés sur les côtés des flasques et qui servent de frein soit pour les routes, soit pour limiter le recul. Enfin l'acier doux est employé pour la fabrication des essieux d'affût. Sa qualité est déterminée par cette condition qu'une éprouvette de 16 millimètres de diamètre sur une longueur de 100 millimètres, présente une résistance à la rupture de 45 kilogrammes avec 25 pour 100 d'allongement.

Projectiles. — Au fur et à mesure que les plaques de blindages augmentaient d'épaisseur, l'emploi des métaux présentant une durceté supérieure à celle de la fonte ordinaire devait nécessairement s'imposer pour la fabrication des projectiles de rupture et de pénétration. Les *obus* en fonte trempée, dans la production desquels les usines de Terre-Noire et de Saint-Jacques à Montluçon ont longtemps rivalisé, ne pouvaient résoudre la question que d'une manière incomplète, et on en est venu aux obus en acier fondu semblables à ceux que l'artillerie allemande emploie depuis longtemps dans de semblables circonstances. On y emploie de préférence des métaux durs, donnant après la trempe ou après recuit une résistance d'environ 70 kilogrammes avec un allongement variant de 8 à 10 pour 100. Le but auquel on doit tendre est la réalisation d'une grande dureté pour l'ogive du projectile et une certaine douceur pour l'arrière, c'est-à-dire pour toute la partie cylindrique qui doit, lors de la pénétration du projectile, résister aux efforts de torsion et de flexion. L'emploi des aciers chromés paraît devoir contribuer à la solution de ce problème, qui n'a pas été entièrement réalisée jusqu'aujourd'hui.

A côté de l'*obus* vient se placer un autre engin de destruction, sur lequel l'attention publique a été bien souvent appelée dans ces derniers temps. C'est la *torpille*, qui se fait également en acier et dont la fabrication monopolisée jusqu'à ce jour par une usine située sur le territoire austro-hongrois, près de Fiume, doit, comme pour le canon et l'*obus*, revenir bientôt à nos ateliers français.

Nous terminerons ce chapitre par une observation déjà bien souvent présentée, mais qui s'impose sans cesse à l'esprit lorsqu'on traite de ces matières, c'est que les meilleurs fers provenant du puddlage dépassent bien difficilement une résistance de 40 kilogrammes avec un allongement de 15 pour 100, tandis que les fers fondus ou aciers doux, comme on peut aussi les nommer, donnent pour une résistance de 45 kilog. des allongements dépassant aisément 25 pour 100. Ce sont là des avantages dont le constructeur, soit qu'il travaille pour la défense du pays ou pour son expansion industrielle, ne peut manquer de profiter dans une mesure de plus en plus large.

CHAPITRE XX

EMPLOI DES ACIERS DANS LES DIVERSES INDUSTRIES.

Industrie extractive et métallurgique. — Industrie agricole. — Industries et professions diverses.

Après avoir examiné séparément l'emploi des aciers par ces grands organismes de transport terrestres et maritimes, qui ont, depuis trente ans, si profondément modifier les conditions d'existence des divers peuples, il nous reste à résumer les services que rendent ces métaux aux nombreuses industries plus anciennes ou plus modestes, dont le développement a suivi nécessairement celui de la construction des chemins de fer.

Industries extractives. — Les industries extractives, et en particulier celle de l'exploitation de la houille, ont puissamment profité de la production en grande masse des aciers Bessemer et Martin. Aux madriers en bois sur lesquels roulaient péniblement les véhicules de construction grossière et de faible contenance désignés sous le nom de *chiens de mine*, ont succédé des rails formés d'abord de barres plates, puis de rails Vignole dont le poids varie de 4 à 12 kilogrammes, et sur lesquels se meuvent par trains entiers des wagonnets en tôle contenant le plus souvent chacun une demi-tonne de charbon. Les roues de ces wagons, autrefois en fonte ordinaire, sont souvent aujourd'hui en acier fondu qui, en apportant ses qualités de résistance, a rendu bien moins fréquents les ruptures de roues et les déraillements qui en étaient la conséquence. Dans de nombreuses exploitations, on utilise l'excédent de résistance que présentent les tôles d'acier par rapport aux tôles de fer, pour fabriquer avec les premières les caisses des wagonnets, et diminuer ainsi le poids mort de ces récipients qui doivent être à tout moment élevés de plusieurs centaines de mètres, pour amener au jour le combustible ou le minerai qu'ils renferment.

L'entretien des galeries de mines est souvent, dans les terrains difficiles, un des gros soucis et une des grosses dépenses de l'exploitant. Le bas prix auquel sont tombés les rails de chemin de fer a permis de substituer également le fer au bois pour le soutènement des galeries soumises à de fortes pressions. Nous avons vu fréquemment des cadres en vieux rails substitués avantageusement aux murs en maçonnerie, et présenter l'avantage de pouvoir être élevés pour être employés en d'autres points de la mine, lorsque la marche progressive des travaux permettait

l'abandon de la galerie. Grâce à cet heureux emploi de rails en acier, on a pu accom- plir certains travaux de mines qui eussent paru irréalisables autrefois.

Ce que nous avons dit des avantages de la substitution de l'acier au fer pour la construction du matériel roulant souterrain, s'applique avec une opportunité au moins aussi grande à la cage qui fait circuler ce wagonnet dans le puits et au câble métallique qui l'enlève. On sait que la profondeur des puits de mines s'accroît sans cesse; il faut souvent aujourd'hui aller chercher le charbon jusqu'à 800 mètres au-dessous du sol, et des machines d'extraction calculées autrefois pour des profondeurs beaucoup moindres, auraient dû être abandonnées, si la substitution de câbles en fil d'acier aux câbles en fil de fer n'avait permis, en compensant par la diminution du poids au mètre courant l'augmentation de la longueur totale, d'alléger l'effort de la machine pour ces profondeurs imprévues. Nous aimons à citer cet exemple parce qu'il montre le grand avantage que peut assurer à un moment donné l'emploi judicieux des matières, et l'effort fait pour sortir d'une difficulté nouvelle par une heureuse initiative.

Nous ne pouvons entrer ici dans de nombreux détails sur l'outillage mécanique si savant et si ingénieux des industries extractives. Les machines à vapeur de plusieurs centaines de chevaux, qui actionnent les bobines sur lesquelles s'enroulent les câbles d'extraction, font comme les locomotives, et comme les machines motrices marines un emploi de l'acier de plus en plus étendu pour leurs arbres, leurs bielles et leurs manivelles. On trouve à côté d'elles ces énormes machines d'épuisement qui ont pour mission d'élever au jour toutes les eaux de la mine; elles aussi ont à mettre en mouvement un attirail de pompes pesant souvent plusieurs centaines de tonnes, et la substitution de l'acier au fer pour la construction des malteresses tiges a permis d'augmenter l'effet utile de ces puissantes installations. Les mêmes effets se sont produits dans la construction des ventilateurs destinés à extraire de l'édifice souterrain l'air vicié et les dangereuses exhalaisons de la mine. Les larges ailes de ces ventilateurs se font fréquemment aujourd'hui en tôle d'acier qui, présentant plus de raideur que les tôles de fer, rendent à la fois l'appareil plus léger et plus résistant.

Le mineur, dans son pénible travail, est un consommateur d'acier incessant; soit qu'il batte à la main le fleuret destiné à pratiquer le trou de mine dans la roche, soit qu'il se serve d'appareils mécaniques, qui tendent heureusement à se répandre de plus en plus, et dans lesquels le battage se produit au moyen de l'air comprimé, l'outil est toujours en acier. Ce ne sont plus des aciers doux qu'il faut ici, mais des aciers tenant de 0,60 à 0,80 de carbone et susceptible, d'acquérir par la trempe le maximum de dureté. C'est ici que le tungstène et les métaux durcissants, dont nous avons en commençant étudié les effets, peuvent rendre des services signalés; il faut toutefois que leur action à cet égard ne soit pas contre-balancée par une fragilité déterminant un égrainement du tranchant. Outre le fleuret, le mineur emploie encore divers outils qui tous exigent pour leur fabrication des aciers de bonne qualité.

Industries métallurgiques et mécaniques. — Sauf de rares exceptions les innombrables appareils et outils employés à l'élaboration des métaux sont en fer et tout spécialement en acier. Les cylindres de laminoirs, autrefois en fonte, se font

de plus en plus en acier coulé. Il en est de même des matrices, et des diverses formes dans lesquelles se fait le travail à chaud des métaux. Le finissage se pratique au moyen de scies, de limes, de tarauds, de poinçons, de fraises et de burins qui tous doivent, pour résister à une usure trop rapide, présenter le maximum de dureté. Notre classification de la page 66 indique pour eux l'acier extra-dur n° 1, donnant avec une résistance en kilogrammes par millimètre carré de 80 à 105, un allongement qui ne dépasse pas 9 pour 100. La petite quantité de matière première nécessaire à la confection de tous ces outils conduit à employer comme mode de fabrication la fusion au creuset, en n'y consacrant que des matières de qualité tout à fait supérieure. Nous n'irons pas jusqu'à dire que de bonnes fraises ou de bons burins doivent être payés au poids de l'or, mais il est certain que la perte de temps et le dérangement qu'occasionne dans un atelier leur remplacement trop multiplié, conduit à faire passer la question de la qualité bien avant celle du prix d'achat.

La trempe, jouant dans la préparation des aciers pour outils un rôle considérable, nous reproduisons ici un tableau qu'on rencontre dans divers ouvrages et qui donne les recettes en usage pour la préparation des bains au moyen desquels la trempe est pratiquée. Il va sans dire que ces indications n'ont rien d'absolu, et qu'elles peuvent varier suivant la pratique des divers ateliers.

DÉSIGNATION DES ARTICLES.	COMPOSITION DU BAIN
Scies et ressorts divers.	Huile ou graisse animale.
Ressorts de voitures, lames de cisailles.	Immersion rapide dans l'eau ordinaire.
Outils tranchants.	Eau ordinaire, (enduire l'extrémité dans la résine avant la trempe).
Ressorts en fil d'acier et petits outils.	Eau ordinaire (1 litre), gomme arabique (30 ou 40 gr.) ou bien eau de résine et savon noir.
Limes et râpes.	Pour 10 litres d'eau, 500 grammes sel ammoniac et 2 ^{1/2} ,500 sel marin.
Outils très durs.	Pour 100 litres d'eau, 5 kilog. sel marin, 1 litre alcool, 40 centilitres acide sulfurique.
Outils très durs à employer à froid.	Pour 10 litres d'eau, 40 gr. acide sulfurique, 10 gr. acide azotique, 10 gr. acide pyrolygneux.
Outils délicats, burins, petits forets.	Suif de mouton 10 parties, huile d'olive 3 ^{1/2} parties, résine 5 parties, sel ammoniac 2 parties.

Industries agricoles. — La substitution successive du fer au bois, puis de l'acier au fer a été également la caractéristique de l'évolution survenue dans cette branche fondamentale de l'activité humaine. Nous ne nous trouvons pas ici, pour l'emploi des nouveaux métaux, en présence de prescriptions aussi savantes que celles émanant des administrations de chemins de fer ou des services de la marine et de la guerre, et pourtant un emploi méthodique et raisonné de la matière y serait aussi avantageux, puisqu'il permettrait de faire face aux pénibles travaux des champs avec des outils de poids moindre, tout en permettant un effet utile équivalent. La pratique a amené d'ailleurs, plus lentement il est vrai, aux résul-

tats que l'étude théorique permettait d'envisager du premier coup. Il suffit pour s'en convaincre de comparer l'outil désigné communément sous le nom de « fourche américaine », avec les objets de même nom employés il y a quelques années encore dans les exploitations rurales. De même l'emploi des tôles d'acier pour la confection des pelles et des bêches a permis de diminuer notablement leur poids, tout en leur assurant une plus grande résistance à l'usure. Mais c'est surtout dans la construction des machines agricoles de formes plus compliquées, que l'emploi de métaux homogènes et résistants permettra d'arriver à des progrès qu'on soupçonne à peine encore aujourd'hui. Que de fois nous est-il arrivé d'entendre des agriculteurs déclarer qu'ils avaient renoncé à l'emploi de machines à battre ou d'appareils similaires, par suite des nombreuses avaries qui venaient à tout moment en entraver l'utilisation. Que les engrenages de ces machines, au lieu d'être faits en fonte ordinaire de qualité souvent médiocre, soient obtenus au moyen de l'acier coulé ; que les diverses pièces du mécanisme, au lieu d'être en fer de dernière qualité, soient forgées dans un métal joignant à la ductilité les qualités élastiques que présentent les aciers doux, et nous verrons l'agronome, ayant en main un outil de choix, en multiplier les applications. Ce sont là des résultats qui peuvent être obtenus facilement, grâce aux prix si réduits que les progrès de l'industrie métallurgique permettent d'obtenir aujourd'hui pour les produits de qualité supérieure lorsqu'on sait les utiliser.

Constructions. — Là aussi, nous voyons s'ouvrir à l'emploi de l'acier de bien intéressantes perspectives. Le mémoire de M. Périssé, auquel nous avons fait de fréquents emprunts, renferme une nomenclature importante de ponts construits en acier ; mais, comme pour les autres emplois, on s'est servi dans les premiers essais d'un métal trop dur, auquel on demandait des résistances dépassant 60 kilogrammes par millimètre carré. Il s'est produit ici un fait analogue à celui que nous avons eu l'occasion de déplorer dans la construction des premières chaudières en métal fondu. On ne saurait nier que des métaux à grande résistance, employés dans la construction des édifices, permettraient, en diminuant encore davantage la section des pièces, de charmer le regard par une plus grande légèreté, et de réaliser de plus grandes économies dans l'emploi des matières ; mais, à vouloir dépasser le but, on risque de compromettre à tout jamais le résultat. Les constructeurs, trop rares encore, qui ont fait de l'emploi de l'acier dans leurs travaux l'objet de leurs intéressantes études, ont mieux envisagé la question en demandant seulement une résistance de 42 kilogrammes, avec un allongement minimum de 20 pour 100, une striction minima de 45 pour 100 et une limite d'élasticité de 50 kilogrammes. Ce sont là des conditions d'épreuves analogues à celles qui sont demandées par l'Union des chemins de fer allemands pour les aciers doux, et c'est grâce à ces prescriptions que l'emploi de ces métaux s'est beaucoup plus répandu jusqu'à présent en Allemagne que dans notre pays.

Les matériaux les plus fréquemment employés dans les constructions, sont les barres à double T, les barres en U, les cornières à ailes égales et inégales, enfin les plats, les ronds et les carrés. Les établissements métallurgiques emploient le plus souvent aujourd'hui, pour la fabrication de ces diverses barres profilées, des vieux rails en fer, généralement phosphoreux, qu'on se procure à vil prix ; le prix

de revient et, par suite, le prix de vente des produits qui en résultent, se sont également beaucoup abaissés ; mais on ne peut demander à ces matières qu'une qualité variable, ou plutôt généralement médiocre. Ce que nous avons dit des propriétés spéciales que doivent présenter les fontes employées dans les procédés Bessemer ou Martin, les indications que nous avons fournies sur le coût de l'opération, montrent qu'on pourra difficilement livrer les fers homogènes profilés à un prix aussi réduit que les fers provenant du réemploi des vieux rails ; mais les avantages des premiers sur les seconds sont tels, au point de vue de leurs propriétés mécaniques, que l'avenir leur appartient d'une manière incontestable.

Industries et métiers divers. — Parmi les nombreux artisans occupés à la confection du mobilier, du vêtement et de ces mille objets dont nous faisons jurement usage ; parmi les représentants des carrières libérales, ces artistes, ces savants qui forment comme le couronnement de notre édifice social, il n'en est pas un seul qui ne demande à l'acier son concours pour l'accomplissement de son œuvre ; mais au fur et à mesure que le travail devient plus délicat et plus abstrait, l'outil s'affine et son volume décroît ; c'est la pointe de Paris enfouie par le marteau léger de l'ébéniste ou du tapissier ; c'est l'aiguille et l'épingle manœuvrées par des mains agiles ; c'est la lancette du chirurgien, le burin du graveur, la plume enfin. Parmi ces minuscules produits de l'industrie métallurgique, il en est qui, malgré leur petitesse, sont si universellement employés qu'ils représentent néanmoins un tonnage appréciable. Ce sont ceux qui, formant le groupe des pointes, des vis, des aiguilles, des épingle, dérivent du fil de fer ou plutôt du fil d'acier doux, qui tend de plus en plus à se substituer, aussi pour ces usages, au fer ordinaire. Est-il besoin de rappeler les emplois de ce fil lui-même pour la transmission de l'électricité, la fabrication des ressorts de toute espèce, pour la construction des élévations de toute sorte. La description des nombreux appareils employés dans les tréfileries, l'examen des précautions à prendre dans les diverses passes entre les mâchoires de la filière et dans les recuits qui les accompagnent ; l'étude de ces machines à vis si ingénieusement combinées, qui, dans un moment à peine saisissable, coupent le fil, font la pointe, le filet, la tête et sa rainure tout cela pourrait fournir le texte d'un volume dans lequel le mot « acier » devrait être prononcé à chaque page. Mais en traitant ici ces sujets avec le développement qu'ils comportent, nous nous écarterions de plus en plus des considérations chimiques qui doivent surtout prévaloir dans cette Encyclopédie. Peut-être même avons-nous été entraînés à donner à cette étude des emplois de l'acier une importance trop considérable ; nous l'avons fait parce qu'ils obéissent aujourd'hui à des règles précises que les progrès de la chimie ont tout spécialement contribué à établir, et rentrent ainsi dans le domaine de cette science.

INDEX ALPHABÉTIQUE

DES OUVRAGES ET DOCUMENTS CONSULTÉS

A

- AKERMAN. — *Ueber den Standpunkt der Eisen Fabrication in Schweden* (État de la fabrication du fer en Suède). — Stockholm, 1873.
- *Etat actuel de la métallurgie du fer en Suède*. — Exposition universelle de Paris, 1878.
- *Note sur la trempe du fer et de l'acier*. — Revue universelle de Liège, 1880.

B

- BARBA. — *Étude sur les allongements des métaux après rupture*. — Société des Ingénieurs civils, 1880.
- BAUSCHINGER. — *Zeitschrift des bairischen Architekt und Ingenieur Vereins* (Journal de la Société des Ingénieurs et Architectes bavarois), 1875.
- BOMAN. — *Das Bessemern in Schweden in seiner jetzigen Praxis* (Etat actuel de la fabrication de l'acier Bessemer en Suède). Leipzig, 1864.
- BOCHUM (Société de). — *Notice sur les Expositions de 1867 et de 1875*.
- BRESSON. — *Considérations sur l'emploi exclusif des rails d'acier par les Compagnies de chemins de fer*. — Annales des Mines, 1876.
- *Note sur l'état actuel de la métallurgie du fer et de l'acier en Autriche-Hongrie*. — Société des ingénieurs civils, 1884.

- BRICKA. — *Rapport sur la mission pour l'étude des voies entièrement métalliques à l'étranger*. — Paris, 1886.

C

- CARON. — *Comptes rendus à l'Académie des Sciences*.
- CASTEL. — *Fabrication de l'acier par le procédé Bessemer à l'usine de Gratz*. — Annales des Mines, 1865.
- CAZES. — *Sur la nature de l'acier le plus convenable pour la fabrication des rails*. — Revue générale des chemins de fer, 1885.
- CLÉMANDOT. — *La trempe par compression*. — Paris, Steinheil, 1885.
- CLÉBAULT. — *Notes sur quelques points particuliers de la production et du travail de l'acier Bessemer en Styrie et en Carinthie*. — Annales des Mines, 1869.
- COMPTOIR DES FORGES DE SUÈDE (Jernkontoret). — *Expériences de force et de traction sur des tôles suédoises produites par des procédés divers*. — Stockholm, 1878.
- CONDIDÈRE. — *Mémoire sur l'emploi du fer et de l'acier dans les constructions*. — Annales des ponts et chaussées, 1885.
- CREUSOT (Usine du). — *Notices et catalogues publiés à l'occasion des Expositions de 1873 et de 1878*.
- *Cahiers des charges des administrations de chemins de fer françaises, allemandes et austro-hongroises pour la fourniture du matériel de la voie et du matériel roulant*.
- *Catalogues spéciaux des divers pays aux Expositions universelles de 1873 et 1878*.

D

- DESNAYES. — *Note sur l'emploi du spectroscope*

- dans le procédé Bessemer. — Association française pour l'avancement des sciences. 1875.*
- DESHATES.** — *Classement et emploi des aciers.* — Paris. Dunod, 1887.
- *Note sur les rapports existant entre la composition chimique et les propriétés mécaniques des aciers.* — Annales des Mines, 1879.
- DELAFOND.** — *Fabrication de l'acier.* — Annales des Ponts et Chaussées. 1882.
- DUBLAY.** — *The wearing power of steel rails in relation to their chemical composition and physical properties* (De la résistance à l'usure des rails en acier par rapport à leur composition chimique).
- E**
- ECKMAN ET EGGERZ.** — *Brochure publiee sur Fingspong à l'occasion de l'Exposition universelle de 1867.*
- EUVERTE.** — *Fabrication des rails en acier phosphoré de Terre-Noire.* — Société des Ingénieurs civils, 1874.
- *L'acier sans soufflures.* — Société des Ingénieurs civils, 1877.
- F**
- FREMY.** — *Comptes rendus à l'Académie des Sciences.* — 1861, 1862.
- *Sur la production de l'acier des fontes françaises considérées jusqu'à présent comme aciéreuses.* — Paris, 1862.
- FREMY ET PELOUZE.** — *Traité de chimie générale, analytique, industrielle et agricole.* — Paris, 1865.
- G**
- GAUTIER.** — *Le tracé des cylindres pour le laminage du fer.* — Société de l'industrie minérale, 1871.
- *Sur les progrès de la déphosphoration.* — Société des ingénieurs civils. 1879 et 1880.
- *Emploi du spectroscope en métallurgie.* — Génie civil, 1880.
- GIBBS.** — *On the successful rolling of steel ingots with their own initial heat* (Laminage des lingots d'acier en utilisant leur chaleur propre). Iron and steel Institute 1882.
- GREINERT.** — *Installations américaines pour le procédé Bessemer basique d'après A. Holley.* — Revue universelle de Liège, 1882.
- GRUNER.** — *De l'acier et de sa fabrication.* — Paris. Dunod, 1868.
- *Traité de métallurgie (1^{re} partie, Métallurgie générale).* — Paris. Dunod, 1875 et 1878.
- *Note sur le vrai sens du mot acier.* — Annales des Mines et des Ponts et Chaussées, 1877.
- *Sur la nature de l'acier le plus convenable pour les rails.* — Annales des Mines, 1881.
- GRUNER (Edouard).** — *Mémoire sur la situation de la métallurgie du fer en Styrie et en Carinthie.* — Annales des Mines, 1876.
- H**
- HENRY.** — *Mémoire sur la fabrication du fer, de l'acier puddlé et de l'acier fondu au four rotatif Pernot à l'usine de Saint-Chamond.* — Annales des Mines, 1874.
- J**
- JORDAN.** — *Fabrication du ferromanganèse à l'usine de Saint-Louis.* — Société des ingénieurs civils, 1877.
- *Note sur les ressources de l'industrie du fer en France.* — Revue universelle de Liège, 1878.
- *Les récents progrès de la métallurgie.* — Conférence faite à la Sorbonne en 1881.
- JULLIEN.** — *Théorie de la trempe.* — Paris, 1862.
- K**
- KERPELY.** — *Das Eisen auf der Wiener Welt-ausstellung.* — (Le fer à l'Exposition universelle de Vienne). — Schemnitz, 1873.
- *Das Eisenhütten wesen in Ungarn.* (La métallurgie du fer en Hongrie). Iron and steel Institute. 1882.
- KURZWERNHART.** — *Ueber die Production von stahlschienen mit Braunkohle in Teplitz* (Production des rails d'acier au moyen des Lignites de Teplice). — Iron and steel Institute, 1882.
- KRUPP (Usines de).** — *Notices publiées à l'occasion de l'Exposition de 1875.* — Essen, 1875.

L

LAX. — *La métallurgie à l'Exposition de 1878.*
— Annales des Mines, 1879.

LEBASTEUR. — *Les métaux à l'exposition universelle de 1878.* — Paris. Dunod, 1879.

M

MARTIN. — *Nouveau procédé de fabrication de l'acier.* — Paris. Renouard, 1869.

N

NEUBERG-MARIAZELL (Société de). — *Notices publiées à l'occasion des Expositions de 1873 et 1878.*

NIJNE-TAGUILSK (Usines de). — *Notice sur les usines du prince Demidoff, publiée à l'occasion de l'Exposition de 1878.*

O

OSMOND ET WERTH. — *Théorie cellulaire des propriétés de l'acier.* — Annales des Mines, 1885.

P

PERRISSÉ. — *Analyse des mémoires lus et discutés en 1875 à la Société des ingénieurs civils de Londres sur la fabrication de l'acier.* — Société des ingénieurs civils, 1876.

— *De l'emploi de l'acier dans les constructions navales, civiles et mécaniques.* — Société des Ingénieurs civils, 1884.

PÉTIN. — *Note sur les fours rotatifs Pernot.*
— Iron and steel Institute, 1874.

POURCEL. — *Essais de déphosphoration et déphosphoration des fontes.* — Société de l'Industrie minérale, 1879.

— *La déphosphoration au congrès métallurgique de Dusseldorf.* — Génie civil, 1881.

— *Note of the manufacture of solid steel castings (Note sur la fabrication des moules d'acier sans soufflures).* — Iron and steel Institute, 1882.

R

RIVOT. — *Traité de Docimacie.* — Dunod, 1804.

ROLLAND. — *Note sur l'acier chromé.* — Annales des Mines, 1878.

S

SERAING (Établissements John Cockerill à). — *Notices publiées à l'occasion de l'Exposition universelle de 1878.* — Liège, 1878.

— *De l'acier dans les constructions.*
Liège, 1878.
— *Du classement des aciers.* — Liège, 1878.

SIEMENS. — *Construction et conduite des fours à gaz à chaleur régénérée.* — Paris. Dunod, 1869.

— *De l'application du four à gaz et à chaleur régénérée au puddlage du fer et à la production de l'acier fondu,*
— Paris. Dunod, 1809.

STEIERISCHE EISEN-INDUSTRIE GESELLSCHAFT. — *Société métallurgique de Styrie.* — *Eine Beilage zur Weltausstellung 1873 in Wien.* (Note pour l'exposition de Vienne en 1873).

SOCIÉTÉ AUTRICHIENNE DES CHEMINS DE FER DE L'ÉTAT. — *Notices et catalogues publiés à l'occasion des Expositions de 1873 et 1878.*

T

TCHERNOFF. — *Documents sur la fabrication de l'acier Bessemer.* — Revue universelle de Liège, 1877, 1878.

— *Recherches sur la structure des lingots d'acier coulé.* — Société de l'Industrie minérale, 1880.

TERRE-NOIRE (Société des forges de). — *Notices et catalogues publiés à l'occasion de l'Exposition de 1878.*

TETMAIER. — *Bericht über die vergleichende Werthbestimmung einer Reihe deutscher normal profile in Fluss und Schweiss-eisen (Rapport sur la valeur relative d'une série de profils allemands en fer fondu et en fer soudé).* Zurich, 1885.

TRASENSTEIN. — *Études sur la déphosphoration.*
— Revue universelle de Liège, 1877 et 1878.

— *Industrie du fer en Allemagne.* — Revue universelle de Liège, 1880.

THOMAS (et Gilchrist). — *Déphosphoration au convertisseur.* — Iron and steel Institute, 1878.

TUNNER. — *Die Lage der Eisen Industrie in Steiermark und Kärnten* (Situation de l'industrie métallurgique en Styrie et en Carinthie). — Iron and steel Institute, 1882.

V

VALTOX. — *Rapport du jury de l'Exposition de 1876 à Philadelphie.* — Paris, Imprimerie nationale. 1877.

TABLE DES MATIÈRES

PREMIÈRE PARTIE

CHAPITRE PREMIER

Considérations générales sur la constitution des aciers.

Dificultés que présente la définition des aciers. — Recherches de Berthier, Faraday et Stodart. — Travaux de M. Chevreul. — Théorie fondamentale de M. Fremy sur la constitution des aciers. Cette théorie, en écartant définitivement l'hypothèse de la propension aciéreuse des minéraux, ouvre la voie à l'étude méthodique des propriétés de l'acier. — Influence de cette étude sur les progrès actuels de la métallurgie. — Théorie nouvelle de MM. Osmond et Werth. — Conclusion.	1
--	---

CHAPITRE II

Influence de la composition chimique des aciers sur leurs propriétés physiques et mécaniques.

Notions préliminaires. — Efforts de traction, de compression, de cisaillement, de flexion, de torsion. — Efforts continus et répétés. — Chocs. — Expériences de MM. Barha, Wöhler et Spangenberg. — Expériences récentes et mémoire M. de Considère sur les mêmes questions.	10
--	----

CHAPITRE III

Influence chimique des aciers sur leurs propriétés physiques et mécaniques.

I. — Influence des métalloïdes	18
--	----

CHAPITRE IV

Influence de la composition chimique des aciers sur leurs propriétés physiques et mécaniques.

II. — Influence des métaux	20
--------------------------------------	----

CHAPITRE V

Influence de la chaleur et du magnétisme sur les propriétés physiques et mécaniques des aciers.

Chauffage d'une barre d'acier et phénomènes qui l'accompagnent. — Fusion; aspect et caractères des aciers fondus. — Solidification; structure et densité des aciers solidifiés. — Trempe et recuit. — Actions magnétiques.	37
--	----

CHAPITRE VI

Influence des opérations auxquelles les aciers sont soumis dans leur fabrication et leur finissage sur leurs propriétés physiques et mécaniques.

Ecrouissage. — Compréssion. — Poinçonnage. — Cisaillage. — Expériences de M. Considère sur les conséquences de ces diverses opérations	50
--	----

CHAPITRE VII

Classification des aciers.

Principe des diverses classifications. — Classification de Tunner pour les aciers de Neuberg. — Classification des aciers suédois. — Classifications françaises	61
---	----

DEUXIÈME PARTIE

CHAPITRE VIII

**Considérations générales sur les divers modes de fabrication des aciers.
Procédés directs de fabrication.**

Fonte malléable aciéreuse. — Acier de forge; bas-foyers et diverses méthodes qui les emploient. — Aciers puddlés. — Essais de réduction sans fusion. — Procédés Chenot, Blain. — Passage de la méthode directe à la méthode indirecte	67
---	----

CHAPITRE IX

Fabrication de l'acier Bessemer.

Étude du principe et de la marche de l'opération. — Aperçu historique. — Nature et analyses des fontes employées. — Division de l'opération en périodes et caractères de chacune d'elles. Allures de l'opération. — Arrêt. — Emploi du spectroscope. — Examen analytique du bain métallique, de la scorie et des gaz à divers moments de l'opération	75
--	----

CHAPITRE X

Fabrication de l'acier Bessemer (suite).

Disposition des ateliers et description des appareils	99
---	----

CHAPITRE XI

Roulement des ateliers Bessemer et étude économique de la fabrication.

Organisation du personnel. — Production. — Prix de revient.	101
---	-----

CHAPITRE XII

Modifications apportées dans le procédé Bessemer par la déphosphoration.

Principe de l'opération. — Nature et analyses des fontes employées. — Modification des appareils. — Étude économique de la fabrication.	105
---	-----

CHAPITRE XIII

Fabrication de l'acier Martin.

Principe du procédé. — Construction des fours et des gazogènes. — Matériaux réfractaires. — Étude des résultats économiques.	111
--	-----

CHAPITRE XIV

Fabrication de l'acier au creuset.

Résumé historique. — Creusets. — Fours de fusion. — Marche des ateliers.	121
--	-----

CHAPITRE XV

Cémentation.

Fours de cémentation. — Conduite de l'opération. — Théorie de la cémentation	127
--	-----

TROISIÈME PARTIE

CHAPITRE XVI

Considérations générales sur l'emploi des aciers.

Fer soudé. — Acier soudé. — Fer fondu. — Acier fondu.	130
---	-----

CHAPITRE XVII

Dégrossissage des aciers.

Marieaux. — Laminoirs. — Presses hydrauliques. — Fours de réchauffage	135
---	-----

CHAPITRE XVIII

Emploi de l'acier par les chemins de fer.

Rails. — Petit matériel d'attache. — Traverses métalliques. — Matériel fixe de la voie. — Bandages. — Essieux. — Ressorts. — Moulages en acier	159
--	-----

CHAPITRE XIX

Emploi de l'acier par les administrations de la marine et de la guerre.

Tôles, cornières, barres, profilées. — Blindages. — Pièces mécaniques. — Canons, affûts et projectiles	156
--	-----

CHAPITRE XX

Emploi des aciers dans les divers industries.

Industrie extractive et métallurgique. — Industrie agricole. — Industries et professions diverses	163
---	-----

INDEX ALPHABÉTIQUE DES OUVRAGES ET DOCUMENTS CONSULTÉS	168
---	------------

